

Docket No.: 49657-961

*S. Stevenson*  
*362601*  
PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of

Kenji ITOGA, et al.

Serial No.: 09/769,490

Filed: January 26, 2001



Group Art Unit: 2876

Examiner:

For: X-RAY EXPOSURE APPARATUS, X-RAY EXPOSURE METHOD, X-RAY MASK, X-RAY MIRROR, SYNCHROTRON RADIATION APPARATUS, SYNCHROTRON RADIATION METHOD AND SEMICONDUCTOR DEVICE

TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENTS

Honorable Commissioner for Patents and Trademarks  
Washington, D. C. 20231

Sir:

At the time the above application was filed, priority was claimed based on the following applications:

International Patent Application No. PCT/JP00/03337,  
filed May 24, 2000;  
and  
Japanese Patent Application No. 11-149621,  
filed May 28, 1999

A copy of each priority application listed above is enclosed.

Respectfully submitted,

MCDERMOTT, WILL & EMERY

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "S. Becker".

Stephen A. Becker  
Registration No. 26,527

600 13<sup>th</sup> Street, N.W.  
Washington, DC 20005-3096  
(202) 756-8000 SAB:dtb  
**Date: April 19, 2001**  
Facsimile: (202) 756-8087

49657-961

Itoga, et al.

S# 09/769, 490  
Filed: 1/26/05

日 本 国 特 許 庁

PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類は下記の出願書類の謄本に相違ないことを証明する。  
This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed  
with this Office.

出 願 年 月 日                      2000年5月24日  
Date of Application:

出 願 番 号                      PCT/JPO0/03337  
Application Number:

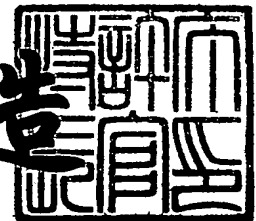
出 願 人                      三菱電機株式会社  
Applicant (s):                      キヤノン株式会社  
   糸賀 賢二  
   北山 豊樹  
   渡辺 豊  
   鶴沢 俊一



2001 年 1 月 19 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

及川耕造



出証平 13-500005

## 特許協力条約に基づく国際出願願書

原本（出願用） - 印刷日時 2000年05月23日（23. 05. 2000）火曜日 13時56分54秒

900004

0	受理官庁記入欄	
0-1	国際出願番号.	
0-2	国際出願日	
0-3	(受付印)	
0-4	様式-PCT/R0/101 この特許協力条約に基づく国際出願願書は、 0-4-1 右記によって作成された。	PCT-EASY Version 2.90 (updated 10. 05. 2000)
0-5	申立て 出願人は、この国際出願が特許協力条約に従って処理されることを請求する。	
0-6	出願人によって指定された受理官庁	日本国特許庁 (R0/JP)
0-7	出願人又は代理人の書類記号	900004
I	発明の名称	X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置
II	出願人	
II-1	この欄に記載した者は	出願人である (applicant only)
II-2	右の指定国についての出願人である。	米国を除くすべての指定国 (all designated States except US)
II-4ja	名称	三菱電機株式会社
II-4en	Name	MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA
II-5ja	あて名:	100-8310 日本国 東京都 千代田区 丸の内二丁目2番3号
II-5en	Address:	2-3, Marunouchi 2-chome Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310 Japan
II-6	国籍 (国名)	日本国 JP
II-7	住所 (国名)	日本国 JP
III-1	その他の出願人又は発明者	
III-1-1	この欄に記載した者は	出願人である (applicant only)
III-1-2	右の指定国についての出願人である。	米国を除くすべての指定国 (all designated States except US)
III-1-4ja	名称	キヤノン株式会社
III-1-4en	Name	CANON KABUSHIKI KAISHA
III-1-5ja	あて名:	146-8501 日本国 東京都 大田区 下丸子3丁目30番2号
III-1-5en	Address:	30-2, Shimomaruko 3-chome Ohta-ku, Tokyo 146-8501 Japan
III-1-6	国籍 (国名)	日本国 JP
III-1-7	住所 (国名)	日本国 JP

## 特許協力条約に基づく国際出願願書

原本(出願用) - 印刷日時 2000年05月23日 (23. 05. 2000) 火曜日 13時56分54秒

900004

III-2 III-2-1	その他の出願人又は発明者 この欄に記載した者は	出願人及び発明者である (applicant and inventor)
III-2-2	右の指定国についての出願人である。	米国のみ (US only)
III-2-4ja III-2-4en III-2-5ja	氏名(姓名) Name (LAST, First) あて名:	糸賀 賢二 ITOGA, Kenji 100-8310 日本国 東京都 千代田区 丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
III-2-5en	Address:	c/o MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA 2-3, Marunouchi 2-chome Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310 Japan
III-2-6	国籍(国名)	日本国 JP
III-2-7	住所(国名)	日本国 JP
III-3 III-3-1	その他の出願人又は発明者 この欄に記載した者は	出願人及び発明者である (applicant and inventor)
III-3-2	右の指定国についての出願人である。	米国のみ (US only)
III-3-4ja III-3-4en III-3-5ja	氏名(姓名) Name (LAST, First) あて名:	北山 豊樹 KITAYAMA, Toyoki 100-8310 日本国 東京都 千代田区 丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
III-3-5en	Address:	c/o MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA 2-3, Marunouchi 2-chome Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310 Japan
III-3-6	国籍(国名)	日本国 JP
III-3-7	住所(国名)	日本国 JP
III-4 III-4-1	その他の出願人又は発明者 この欄に記載した者は	出願人及び発明者である (applicant and inventor)
III-4-2	右の指定国についての出願人である。	米国のみ (US only)
III-4-4ja III-4-4en III-4-5ja	氏名(姓名) Name (LAST, First) あて名:	渡辺 豊 WATANABE, Yutaka 146-8501 日本国 東京都 大田区 下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
III-4-5en	Address:	c/o CANON KABUSHIKI KAISHA 30-2, Shimomaruko 3-chome Ohta-ku, Tokyo 146-8501 Japan
III-4-6	国籍(国名)	日本国 JP
III-4-7	住所(国名)	日本国 JP

III-5 III-5-1	その他の出願人又は発明者 この欄に記載した者は	出願人及び発明者である (applicant and inventor)
III-5-2	右の指定国についての出願人である。	米国のみ (US only)
III-5-4ja III-5-4en III-5-5ja	氏名 (姓名) Name (LAST, First) あて名:	鵜沢 俊一 UZAWA, Shunichi 146-8501 日本国 東京都 大田区 下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
III-5-5en	Address:	c/o CANON KABUSHIKI KAISHA 30-2, Shimomaruko 3-chome Ohta-ku, Tokyo 146-8501 Japan
III-5-6	国籍 (国名)	日本国 JP
III-5-7	住所 (国名)	日本国 JP
IV-1	代理人又は共通の代表者、通知のあて名 下記の者は国際機関において右記のごとく出願人のために行動する。	代理人 (agent)
IV-1-1ja IV-1-1en IV-1-2ja	氏名 (姓名) Name (LAST, First) あて名:	深見 久郎 FUKAMI, Hisao 530-0054 日本国 大阪府 大阪市 北区南森町2丁目1番29号 住友銀行南森町ビル
IV-1-2en	Address:	Sumitomo Bank Minamimori-machi Bldg. 1-29, Minamimori-machi 2-chome, Kita-ku Osaka-shi, Osaka 530-0054 Japan
IV-1-3	電話番号	06-6361-2021
IV-1-4	ファクシミリ番号	06-6361-1731
IV-1-5	電子メール	fukami@ma.kcom.ne.jp
IV-2	その他の代理人	筆頭代理人と同じあて名を有する代理人 (additional agent(s) with same address as first named agent)
IV-2-1ja IV-2-1en	氏名 Name(s)	森田 俊雄; 伊藤 英彦 MORITA, Toshio; ITOH, Hidehiko
V	国の指定	
V-1	広域特許 (他の種類の保護又は取扱いを求める場合には括弧内に記載する。)	EP: AT BE CH&LI CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE 及びヨーロッパ特許条約と特許協力条約の締約国である他の国
V-2	国内特許 (他の種類の保護又は取扱いを求める場合には括弧内に記載する。)	KR US

## 特許協力条約に基づく国際出願願書

原本(出願用) - 印刷日時 2000年05月23日 (23. 05. 2000) 火曜日 13時56分54秒

900004

V-5	指定の確認の宣言 出願人は、上記の指定に加えて、規則4.9(b)の規定に基づき、特許協力条約のもとで認められる他の全ての国の指定を行う。ただし、V-6欄に示した国の指定を除く。出願人は、これらの追加される指定が確認を条件としていること、並びに優先日から15月が経過する前にその確認がなされない指定は、この期間の経過時に、出願人によって取り下げられたものとみなされることを宣言する。		
V-6	指定の確認から除かれる国	なし (NONE)	
VI-1	先の国内出願に基づく優先権主張		
VI-1-1	先の出願日	1999年05月28日 (28. 05. 1999)	
VI-1-2	先の出願番号	特願平11-149621号	
VI-1-3	国名	日本国 JP	
VI-2	優先権証明書送付の請求 上記の先の出願のうち、右記の番号のものについては、出願書類の認証謄本を作成し国際事務局へ送付することを、受理官庁に対して請求している。	VI-1	
VII-1	特定された国際調査機関 (ISA)	日本国特許庁 (ISA/JP)	
VIII	照合欄	用紙の枚数	添付された電子データ
VIII-1	願書	5	-
VIII-2	明細書	76	-
VIII-3	請求の範囲	6	-
VIII-4	要約	1	900004. txt
VIII-5	図面	22	-
VIII-7	合計	110	
VIII-8	添付書類	添付	添付された電子データ
VIII-8	手数料計算用紙	✓	-
VIII-9	別個の記名押印された委任状	✓	-
VIII-10	包括委任状の写し	✓	-
VIII-16	PCT-EASYディスク	-	フレキシブルディスク
VIII-17	その他	納付する手数料に相当する特許印紙を貼付した書面	-
VIII-17	その他	国際事務局の口座への振込を証明する書面	-
VIII-18	要約書とともに提示する図の番号	1	
VIII-19	国際出願の使用言語名:	日本語 (Japanese)	
IX-1	提出者の記名押印		
IX-1-1	氏名(姓名)	深見 久郎	



## 特許協力条約に基づく国際出願願書

原本（出願用） - 印刷日時 2000年05月23日（23.05.2000）火曜日 13時56分54秒

900004

IX-2	提出者の記名押印	
IX-2-1	氏名(姓名)	森田 俊雄
IX-3	提出者の記名押印	
IX-3-1	氏名(姓名)	伊藤 英彦

受理官庁記入欄

10-1	国際出願として提出された書類の実際の受理の日	
10-2	図面：	
10-2-1	受理された	
10-2-2	不足図面がある	
10-3	国際出願として提出された書類を補完する書類又は図面であってその後期間内に提出されたものの実際の受理の日（訂正日）	
10-4	特許協力条約第11条(2)に基づく必要な補完の期間内の受理の日	
10-5	出願人により特定された国際調査機関	ISA/JP
10-6	調査手数料未払いにつき、国際調査機関に調査用写しを送付していない	

国際事務局記入欄

11-1	記録原本の受理の日	
------	-----------	--

## 明細書

X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置

5

### 技術分野

この発明は、X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置に関し、より特定の  
10 X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置に関する。

### 背景技術

近年、半導体装置の高集積化、微細化に対する要求はますます強くなってきている。このため、従来よりも微細な半導体集積回路のパターンを形成する必要性  
15 が高まっている。そこで、写真製版加工工程において、従来用いられていた露光光よりもより短波長であるX線を露光光として用いるX線近接露光技術が注目されている。

図24は、従来のX線露光装置の構成図である。図24を参照して、X線露光  
20 装置は、シンクロトロン放射源101とX線ミラー103と熱除去フィルタ104とベリリウム窓105と窒化珪素膜からなる窓122とX線マスク106と半導体ウェハ109を設置する縦型XYステージ123とから構成されている。シンクロトロン放射源101において発生した放射光102は、X線ミラー103、熱除去フィルタ104、ベリリウム窓105、窒化珪素膜からなる窓122を通り、  
25 X線マスク106に到達する。そして、X線マスク106においては、X線吸収体により半導体ウェハ109に転写すべき回路パターンが形成されている。そして、放射光102がX線マスク106を通過することにより、この回路パターンが半導体ウェハ109上に塗布されたレジストに転写される。なお、このようなX線露光装置は、たとえば、NTT R&D Vol. 43, No. 6, p.



501 (1994) に示されている。

ここで、放射光102は、X線領域から赤外線領域までの広い範囲にわたる波長を有する連続スペクトル光である。一方、半導体ウェハ109に転写パターンを転写するX線露光工程において必要とされるX線は、ある適当な波長領域のX線のみが必要とされる。このため、従来のX線露光装置においては、まず、X線ミラー103の反射特性を利用して、波長が約0.7 nm以下の短波長のX線成分を吸収カットする。次に、放射光102がベリリウムからなる熱除去フィルタ104を透過する際に、ベリリウム材の特性から、波長が1.5 nmより長いX線成分は、ほとんどすべて熱除去フィルタ104により吸収カットされる。

10      このようにして、放射光102は、その波長が0.7～1.5 nm程度の範囲となるように調整される。そして、放射光102は、ベリリウム窓105および窒化珪素膜からなる窓122を順次透過していく。この際、ベリリウム窓105や窒化珪素膜からなる窓122での発熱はほとんどない。そして、ベリリウム窓105と窒化珪素膜からなる窓122との間は大気圧のヘリウムにより満たされている。このため、ベリリウム窓105はベリリウム窓105よりも上流側の真空領域と下流側の大気圧領域との隔壁として作用している。そして、熱除去フィルタ104において不要なX線成分をカットしていることにより、ベリリウム窓105の発熱を抑制している。この結果、ベリリウム窓105の機械的強度を保つことが可能となっている。

20      また、窒化珪素膜からなる窓122はヘリウムが充填されている領域と大気との間の隔壁の役割を果たしている。なお、縦型XYステージ123をヘリウム雰囲気中に設置するような装置構成にした場合には、窒化珪素膜からなる窓122は不要となる。

25      そして、X線マスク106には上述のように半導体ウェハに転写するための回路パターンが形成されている。そして、半導体ウェハ109に塗布されたレジストの所定領域に放射光102をX線マスク106を介して照射することにより、この回路パターンを転写する。

ここで、従来、X線ミラー103におけるX線を反射する面の材料としては、金や白金などの重金属が用いられてきている。これは、X線ミラー103に対す

る放射光102の斜入射角を $2^{\circ}$ 程度と比較的大きくしても、露光に用いるX線の波長である $0.7\text{ nm}$ 前後の波長において、 $60\%$ 程度のX線の反射率が得られるためである。そして、このような金や白金などの材料を用いて集光角の大きなX線ミラーを作製することにより、より多くのX線を集光することが検討されている。このようにより多くのX線を集光することで、露光に用いるX線の強度を大きくすることができる。この結果、露光工程において高いスループットを得ることが可能となる。

また、X線ミラー103の材料として、炭化珪素や熔融石英などを用いることも提案されている。この炭化珪素は、斜入射角を約 $1^{\circ}$ と比較的浅く設定することにより、X線の反射率を $90\%$ 程度という大変高い値にすることができる。

また、長波長のX線を吸収カットする熱除去フィルタ104の材料としては、ベリリウム薄膜が提案されているが、この他に、窒化珪素やダイヤモンド薄膜を補助的に用いるという提案もなされている。これは、熱線吸収の効率を上げる目的、およびベリリウム薄膜の酸化防止を図るといった目的のためである。

また、X線マスク106は、通常、炭化珪素などからなるメンブレンと、このメンブレン上に形成されたX線吸収体を備える。ここで、炭化珪素が用いられているのは、露光に用いるX線である、波長が $0.7\text{ nm}\sim 1.5\text{ nm}$ 程度のX線の吸収率が比較的小さいからである。

このように、X線ミラーにおけるX線を反射する面の材料としては金、白金、炭化珪素、熔融石英などが提案されている。また、窓材としては、ベリリウム、窒化珪素、ダイヤモンドなどが提案されている。ここで、これらのいずれにおいても、従来から最も適していると言われているピーク波長が $0.75\text{ nm}$ 程度のX線を露光光として用いることを前提としている。

ここで、最適な露光光としてピーク波長が $0.75\text{ nm}$ 程度のX線が適していると言われていた理由は以下のようなものである。

つまり、原理的には、波長の短いX線を用いるほど得られる光学像の解像度は向上し、微細なパターンを形成することが可能である。しかし、X線の波長が短くなるにつれて、X線のエネルギーは大きくなる。その結果、露光工程において半導体ウェハ109上に塗布されたレジストにX線が照射された場合、このレジ

スト中において光電子が発生する。この光電子の運動エネルギーは、レジストに入射するX線のエネルギーが大きいほど大きくなる。そして、この光電子によりレジストは感光される。その結果、短波長のX線を用いるほど、レジスト内で発生した光電子により感光されるレジストの領域が大きくなってしまうことになる。

- 5 この結果、この光電子の影響により、レジストに形成されるパターンがぼけてしまうことになる。つまり、この光電子の飛程がそのまま解像限界を決定するとされていた。

このため、この光電子の飛程を考慮して、従来露光に用いるX線の最適ピーク波長は、0.75 nm程度であると言われていた。

- 10 このように、光電子の飛程が解像限界を決定すると考えられていたため、従来は、上記のような約0.75 nm程度のピーク波長を有するX線を用いた露光工程によっては、100 nm以下の線幅または線間間隔を有するパターンは形成できないと言われていた。

- 15 このような状況で、X線を用いた露光工程における解像度を向上させるため、従来、低コントラストマスクや、吸収体パターンに縦方向のテーパをつけるなどの位相シフトマスク、光近接効果補正を施したマスクなどを用いることにより、高解像度化を図るという提案がなされている。しかし、いずれも、解像度を大幅に向上させることは困難であった。

- 20 そして、上記のような光電子の飛程の問題が存在するため、露光に用いるX線の波長をより短波長領域にシフトすることにより、高解像度化を図るという考えは、半導体装置の回路パターンの転写を行なうX線露光の技術分野においては従来検討されていなかった。また、短波長領域のX線を用いる場合には、X線のエネルギーが従来より大きいため、X線がX線マスクのX線吸収体を容易に透過する。そのため、必要なコントラストを得るためには、X線吸収体の膜厚を厚くする必要があると考えられる。そして、このような場合には、X線が厚い膜厚を有するX線吸収体により形成された転写用パターンを通過する際に、導波管効果によりX線の透過特性が劣化するので、転写される回路パターンの解像度が低下するという問題があった。このため、転写パターンの微細化は困難であるとされていた。
- 25

5      なお、短波長のX線による露光技術としては、マイクロマシン技術の分野において、露光波長を0.3 nm程度にした例がある。ただし、このように短波長のX線を用いたのは、レジスト中へのX線の透過能を高くすることにより、数ミクロンのパターンを数百ミクロン程度の高さで形成するという、高アスペクトパターン加工を行なうという目的のためである。また、このマイクロマシン技術の分野において要求されているパターン寸法は、上記の半導体装置の分野で求められている要求パターン寸法よりも1桁から2桁以上大きい。また、X線マスクのX線吸収体の厚さも半導体装置の分野で用いられているものより厚い。また、X線マスクの基板もチタンなどの金属を用いている。つまり、上記技術は本発明の技術分野とは全く異なる技術分野に属するものである。さらに、パラジウムターゲットを用いた電子線励起型の点光源を用いた露光装置では、0.415 nm～0.44 nmという波長領域のX線を用いて露光を行うために、窒化硼素からなる基板上に金めっきにより吸収体を形成したマスクを用いた実験例が報告されている。しかし、この技術もシンクロトロン放射源を用いる本発明とは、基本的に異なる技術分野に属するものである。

20      ここで、近年、半導体装置の微細化、高集積化の要求に伴い、デザインルールが0.05  $\mu$ m程度の微細なパターンを形成する必要性が明らかになってきた。そして、上記のようなピーク波長が0.75 nm程度のX線を用いた露光工程では、このような線幅または線間間隔が0.05  $\mu$ mレベルの微細パターンを精度よく形成することは困難であると考えられる。

25      そこで、発明者らは、X線露光技術の適用限界をより微細領域に広げ、高解像度のパターンを高速に転写する（高いスループットを達成する）ことを目的として、さまざまな実験、研究をおこなった。この結果、後述するように従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程に用いることが可能であることを発見した。しかし、現在のX線露光装置は、基本的にピーク波長が0.75 nm程度のX線を露光光として用いることを前提として設計されたものであるため、たとえば0.7 nmよりも小さな波長を有するX線を露光光として有効に使用することが困難であった。

この発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、本発明

の1つの目的は、X線露光に用いるX線の波長を従来よりも短波長領域にまで広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ高いスループットを達成することが可能なX線露光装置を提供することである。

5 本発明のもう1つの目的は、X線露光において用いるX線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能で、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光方法を提供することである。

10 本発明のさらにもう1つの目的は、X線露光において用いるX線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することができ、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に用いるX線ミラーを提供することである。

15 本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に用いるX線マスクを提供することである。

本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に適用可能なシンクロトロン放射装置を提供することである。

20 本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に適用可能なシンクロトロン放射方法を提供することである。

25 本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能で、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光方法を用いて製造される高集積化された半導体装置を提供することである。

発明の開示

この発明の一の局面におけるX線露光装置は、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーを備える。

5 ここで、従来、X線露光においては、レジスト中においてX線照射により発生するグリーンレンジと呼ばれる光電子の飛程が転写パターンの解像限界を決定すると言われていた。そのため、X線露光によっては、線幅または線間間隔が100nm以下のパターンは形成できないと言われていた。

10 しかし、発明者らは、実験的に非化学増幅型のレジストを用いて、50nmのラインパターンを形成できることを発見した。この場合、光電子は光学像を鈍らせる作用を有するが、解像限界を決定する決定的な要因とはなっていなかった。

つまり、光電子により影響を受けたレジスト部分と、X線を直接照射されたレジスト部分との溶解速度比の大きなレジストを用いれば、光電子の飛程は、解像限界を決定する支配要因とならないことを発明者らは発見した。この結果、本発明によるX線露光装置のように、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用

15 いることができることを発明者らは見出した。

この発明者らの知見から、従来X線露光に用いられていたX線の波長よりも短い波長領域のX線を露光工程に利用することができるので、露光工程において従来よりも高解像度なパターンを転写することができる。

本発明においては、具体的には、X線露光装置が、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料、つまり、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収端を有さない材料を含むX線ミラーを備える。このため、従来用いられていた0.75nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従

20 来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域のX線をより確実に反射す

ることができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、高いスループットを得ることができる。

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

ここで、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線を露光工程に用いるようにしたのは、以下のような理由による。すなわち、X線の波長が0.45 nm未満である場合は、X線に対するレジストの感度がかえって低下し、高解像度の回路パターンを転写することが難しくなる。また、従来より高い解像度の回路パターンを転写すると同時に、従来より高いスループットを実現するためには、従来利用されていた0.7 nm超えの波長領域よりも短波長領域となる0.7 nm以下の波長領域のX線を用いることが効果的であるためである。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線がシンクロトン放射源から出射した放射光に含まれていてもよい。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

この場合、0.3 nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

上記一の局面におけるX線露光装置は、前記X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

この場合、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも、より短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。このため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、上記X線ミラーがX線について0.45 nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

この場合、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、0.45 nm以上0.7 nm以下という波長領域のX線をほとんど本発明によるX線ミラーは吸収しない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

なお、ベリリウムの吸収端は11.1 nmであり、チタンの吸収端は0.249734 nm、2.729 nmであり、銀の吸収端は0.048589 nm、0.32564 nm、0.35164 nm、0.36999 nm、3.082 nmおよび3.114 nmであり、ルテニウムの吸収端は0.056051 nm、0.3835 nm、0.4180 nm、0.4369 nmおよび4.43 nmであり、ロジウムの吸収端は0.053392 nm、0.3629 nm、0.39425 nm、0.41299 nmおよび4.04 nmであり、パラジウムの吸収端は0.05092 nm、0.3437 nm、0.37228 nm、0.39074 nmおよび3.70 nmである。また、窒素の吸収端は3.099 nmであり、炭素の吸収端は4.368 nmである。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

この場合、基板として、加工が容易な材料を用いることにより、この基板を予め球面などX線ミラーに必要な形状となるような加工を施すことができる。この結果、容易に大型で、かつ複雑形状のX線ミラーを作製することができる。



上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーが、X線を集光する機能を有していてもよい。

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線を集光する機能も兼ね備えるので、X線露光装置の構造をより簡略化することができる。

- 5      上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーが、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい。

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線ミラーから出射するX線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、X線露光装置の構造をより簡略化することができる。

- 10      上記一の局面におけるX線露光装置では、X線集光ミラーをさらに備えていてもよい。

この場合、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

- 15      また、このように、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とするため、従来のX線露光装置にこの短波長カット用のX線ミラーを挿入することにより、従来のX線露光装置を、容易に本発明によるX線露光装置へと改造することが可能となる。この結果、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いることができると同時に、本発明によるX線露光装置を実現するためのコストを低減することができる。

- 20      上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラーをさらに備えていてもよい。

この場合、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

- 25      また、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とすることにより、従来のX線露光装置に、本発明による短波長カット用のX線ミラーを挿入することによって容易に本発明によるX線露光装置を実現することができる。この結果、本発明によるX線露光装置を実現するためのコストを削減することができる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、機械的に研磨されていてもよい。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、化学的に研磨されていてもよい。

- 5      上記一の局面におけるX線露光装置は、X線マスクをさらに備えていてもよい。X線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

- 10      この場合、本発明によるX線マスクのメンブレンとして用いる材料は、従来のメンブレンとして用いられていたシリコン系の材料のように、 $0.67\text{ nm}$ 付近の波長領域において吸収端を有していないので、 $0.45\text{ nm}$ 以上 $0.7\text{ nm}$ 以下の波長領域におけるX線のトータルでの透過率を従来よりも高くすることができる。この結果、より確実に露光工程に要する時間を従来よりも短縮することができるので、露光工程のスループットを従来よりも高くすることができる。

- 15      上記一の局面におけるX線露光装置では、X線マスクをさらに備えていてもよく、そのX線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について $0.45\text{ nm}$ 未満の波長領域および $0.7\text{ nm}$ 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、 $0.6\text{ nm}$ 以上 $0.85\text{ nm}$ 未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。
- 20

この場合、メンブレンに含まれる材料は $0.45\text{ nm}$ 以上 $0.7\text{ nm}$ 以下の波長領域において吸収端を有さないので、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

- 25      ここで、材料の吸収端波長ではX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後 $0.15\text{ nm}$ という波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が $0.6\text{ nm}$ 以上 $0.85\text{ nm}$ 未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（ $0.45\text{ nm}$ 以上 $0.7\text{ nm}$ 以下）において、露光に用いるX線をこのX線吸収体により確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料

をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを薄くすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、従来よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

- 5       上記一の局面におけるX線露光装置では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

ここで、タングステン(W)の吸収端は0.683nmであり、タンタル(Ta)の吸収端は0.711nmであり、レニウム(Re)の吸収端は0.656nmである。

- 10       上記一の局面におけるX線露光装置では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

この場合、X線吸収体が複数の層から構成されるので、X線吸収体として用いられる材料の選択の自由度を大きくすることができる。

- 15       また、X線について吸収ピーク波長の異なる複数の材料をX線吸収体として用いることができるので、広い波長領域のX線を吸収しなければならない場合に、単一の材料を用いた1層のX線吸収体を形成する場合よりも、X線吸収体の膜厚を薄くすることが可能となる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、第1層に含まれる第1材料が、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい。

- 20       この場合、第1および第2材料のように原子量の異なる元素を含み、複数の層を形成することにより、各層ごとにX線の吸収ピーク波長を変えることができるので、より広い波長範囲にわたって確実にX線を吸収することができる。

- 25       また、第1材料としてモリブデンやロジウムなどの原子量の大きな重元素を用いてもよい。また、第2材料として、炭素やベリリウムなどの原子量の小さい軽元素を用いてもよい。

このように、重元素と軽元素とを積層するようなX線吸収体を形成するので、確実にX線を反射することにより遮光できる。そのため、X線の遮光能力をほぼ同等にする場合には、従来よりもX線吸収体の膜厚をより薄くする事が出来る。この結果、X線吸収体に形成される、転写回路パターンのアスペクト比を小さ

くすることができる。ここで、アスペクト比とは、X線吸収体に形成された転写回路パターンにおいて溝を考えた場合に、溝の底部の幅と溝の深さとの比をいい、底部の幅が一定で、溝の深さが大きくなると、アスペクト比は大きくなる。このようにアスペクト比を小さくできるので、転写パターンを容易に形成することができると同時に、高い転写精度を実現することができる。

上記一の局面におけるX線露光装置は、X線ミラーを複数備えていてもよい。

この場合、露光に用いるX線の光軸の設定など、X線露光装置の設計の自由度を大きくすることができる。また、複数の短波長カット用のX線ミラーを用いることにより、より確実に、露光に用いるX線から短波長のX線を除去することができる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーを、2枚以上4枚以下備えていてもよい。

この場合、2枚のX線ミラーを用いる場合には、このX線ミラーへのX線の斜入射角を調整することにより、この2枚のX線ミラーに入射する前のX線の進行方向と、2枚のX線ミラーから最終的に出射されるX線の進行方向とをほぼ平行にすることができる。また、X線のX線ミラーに対する入射方向とX線ミラーの反射面との角度を調節することにより、露光に用いるX線のピーク波長を調節することができる。

また、3枚もしくは4枚のX線ミラーを用いれば、X線ミラーにおけるX線の斜入射角とX線ミラーから最終的に出射されるX線の光軸の位置とを独立して調節することができるので、X線露光装置の設計の自由度をより大きくすることができる。

また、従来のX線露光装置に本発明によるX線ミラーを挿入する場合には、従来のX線の光軸を変更することなく、本発明によるX線ミラーを従来のX線露光装置に組込むことが可能となる。

また、4枚のX線ミラーを用いる方が、2枚のX線ミラーを用いる場合よりも、変更することができるX線の波長領域をより広くすることができる。

上記一局面におけるX線露光装置では、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち最

初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

5 この場合、X線の入射方向とX線の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができるので、X線の出射方向を変化させることなく、任意の波長のX線を得ることができる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

10 この場合、X線の出射方向を変化させることなく（X線の進行方向を一定に保った状態で）、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を任意に選択することができる。この結果、斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

15 上記一の局面におけるX線露光装置では、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

20 この場合、入射光軸と出射光軸とをほぼ同一とした状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

25 この場合、X線の入射光軸と出射光軸とをほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置および斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更することが可能であってもよい。

この場合、X線マスクの材質や、転写される回路パターンに要求される解像度、

また、レジストの特性などに、より適合するようにX線のピーク波長を調節することができる。この結果、従来よりもより微細な回路パターンを精度よく形成することが可能となる。

この発明の他の局面におけるX線ミラーは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む。

このため、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、高いスループットを得ることができる。

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

上記他の局面におけるX線ミラーは、シンクロトロン放射源から出射した放射光に含まれるX線を反射してもよい。

上記他の局面におけるX線ミラーは、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収して短波長をカットしてもよい。

この場合、0.3 nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

上記他の局面におけるX線ミラーは、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸

収することが可能であってもよい。

この場合、従来用いられていた  $0.75\text{ nm}$  程度の波長よりもより短波長領域の X 線を得ることができる。この結果、本発明による X 線ミラーを X 線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域の X 線を利用することができる。この結果、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

また、短波長領域の X 線を利用するので、X 線のエネルギーも従来より大きくなる。この結果、X 線の照射強度も従来より大きくなるため、露光工程に必要な時間を短縮することができる。この結果、従来よりも高いスループットを容易に実現することができる。

上記他の局面における X 線ミラーは、X 線について  $0.45\text{ nm}$  未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

上記他の局面における X 線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される 1 種のミラー材料を含んでいてもよい。

この場合、本発明による X 線ミラーを構成する材料は、 $0.45\text{ nm}$  以上  $0.7\text{ nm}$  以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、 $0.45\text{ nm}$  以上  $0.7\text{ nm}$  以下という波長領域の X 線をほとんど本発明による X 線ミラーは吸収しない。そのため、従来の X 線ミラーよりも、上記のような波長領域の X 線をより確実に反射することができるので、十分な X 線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

上記他の局面における X 線ミラーは、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

この場合、基板を予め球面やその他 X 線ミラーに求められる必要な形状に加工しておくことにより、容易に大型でかつ任意の複雑形状の X 線ミラーを作製することができる。

上記他の局面における X 線ミラーは、X 線を集光する機能を有していてもよい。

この場合、短波長カット用の X 線ミラーが、X 線を集光する機能も兼ね備えるので、このような X 線ミラーを備える X 線露光装置の構造をより簡略化すること

ができる。

上記他の局面におけるX線ミラーは、X線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい。

5 この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線ミラーから出射するX線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、このようなX線ミラーを備えるX線露光装置の構造をより簡略化することができる。

上記他の局面におけるX線ミラーでは、X線が入射する面が機械的に研磨されていてもよい。

10 上記他の局面におけるX線ミラーでは、X線が入射する面が化学的に研磨されていてもよい。

この発明のもう1つの局面におけるX線露光方法は、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーにX線を入射させるX線入射工程と、前記X線ミラーから出射するX線を用いて露光を行なう露光工程とを備える。  
15

この場合、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

また、本発明におけるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。  
20

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。  
25

上記もう1つの局面におけるX線露光方法は、X線をシンクロトロン放射源から出射させるX線出射工程をさらに備えていてもよい。



上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含んでいてもよい。

5 この場合、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを、確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであつてもよい。

10 この場合、波長が0.7 nmよりも大きいX線を利用していた従来のX線露光方法よりも、より短波長領域のX線を利用することができる。この結果、露光に用いるX線の波長が短くなることにより、従来よりも高い解像度を有する回路パターンを転写することができる。

15 また、X線の波長が短くなることにより、X線の照射強度を大きくすることができるので、従来よりも高いスループットを得ることができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーがX線について0.45 nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

20 上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

25 この場合、本発明によるX線露光方法において用いるX線ミラーは、0.45 nm以上という波長領域において吸収端を有さない。この結果、0.45 nm以上という波長領域においてX線ミラーによりX線が吸収される吸収ピークが存在しないので、より確実にX線の照射強度を確保することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

この場合、基板をX線ミラーに要求される形状に予め加工しておくことができ

るので、複雑な形状のX線ミラーを容易に得ることができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いてX線を集光する工程を含んでいてもよい。

5 この場合、X線ミラーを用いて、短波長をカットする工程とX線を集光する工程とを同時に行なうことができるので、本発明によるX線露光方法を行なうX線露光装置の構造を簡略化することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい。

10 この場合、X線ミラーが、短波長カット機能とX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能とを兼ね備えるので、本発明によるX線露光方法を行なうX線露光装置の構造を簡略化することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、集光ミラーを用いてX線をさらに集光する工程を含んでいてもよい。

15 このため、短波長カット用のX線ミラーと集光ミラーとを独立して用いるので、従来のX線露光装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、容易に本発明によるX線露光方法を実施することができる。

20 上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大ミラーを用いて拡大する工程を含んでいてもよい。

この場合、短波長カット用のX線ミラーと拡大ミラーとを独立して用いるので、従来のX線露光方法を行なうためのX線露光装置に、本発明によるX線ミラーを挿入することで、容易に本発明によるX線露光方法を実施することができる。

25 上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が機械的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が化学的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含

んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

ここで、本発明によるX線マスクのメンブレンにおいて用いる材料は、従来のメンブレンに用いられていたシリコン系の材料とは異なり、0.67 nm付近の波長領域に吸収端を有さない。このため、従来より短波長領域である0.7 nm以下の波長を有するX線を露光工程において用いる場合に、メンブレンにおいてこれらのX線が吸収されることを防止できる。この結果、十分な露光量を確保することができる。このため、従来のX線マスクを用いる場合よりも、X線のメンブレンにおける透過率を高くすることができるので、高いスループットを確保することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、このような従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15 nm程度の波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45 nm以上0.7 nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、従来よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

5       この場合、X線吸収体において複数の層を形成するので、X線吸収体として用いる材料の自由度をより大きくすることができる。また、X線の吸収ピーク波長の異なる材料を組合せてX線吸収体を形成すれば、単一材料を用いてX線吸収体を形成する場合よりも、より薄い膜厚のX線吸収体により確実にX線を遮蔽することができる。

10       上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、第1層に含まれる第1材料は、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい。

15       また、第1材料として、モリブデンもしくはロジウムなどの比較的原子量の大きな重元素を用いてもよく、第2材料として炭素もしくはベリリウムなどの比較的原子量の小さな軽元素を用いることが好ましい。このように、X線の吸収ピーク波長が異なる材料を用いることにより、よりX線吸収体の膜厚を薄くすることができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーを用いてもよい。

20       この場合、複数のX線ミラーを用いることにより、X線ミラーでのX線斜入射角や出射光軸を設計する際の自由度を大きくすることができる。

また、複数のX線ミラーを用いることにより、より確実に短波長領域のX線をカットすることができる。

上記もう1つのX線露光方法では、X線入射工程において、2枚以上4枚以下のX線ミラーを用いてもよい。

25       この場合、たとえば2枚のX線ミラーを用いる場合には、X線ミラーの位置、およびX線のX線ミラーに対する斜入射角を調節することにより、X線のX線ミラーからの出射方向を一定に保った状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を任意に設定することができる。この結果、X線のピーク波長を任意に変更することができる。

また、X線ミラーを3枚もしくは4枚用いれば、X線の光軸を変えることなく、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができる。このため、従来のX線露光方法が行なわれていたX線露光装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、本発明によるX線露光方法を容易に行なうことが可能となる。

- 5        また、3枚もしくは4枚とX線ミラーの枚数を増やせば、X線のピーク波長を調節することが可能な波長領域の幅をより広くすることができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するXミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

この場合、X線ミラーの位置およびX線に対する角度を調節することにより、X線の出射方向を入射方向とほぼ同一にした状態で、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

15        上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

この場合、X線の出射方向と入射方向とをほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線をより確実に得ることができる。

20        また、X線ミラーにおけるX線の入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を調節することにより、X線のピーク波長を調節することができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

25        この場合、X線の出射光軸と入射光軸とをほぼ同一にした状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を調節すれば、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラ

一におけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

この場合、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

- 5      上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更する工程をさらに備えていてもよい。

この場合、X線露光方法において用いるX線マスクや、転写回路パターンに要求される解像度および半導体基板上に塗布されているレジストなどの特性に適應するように、X線のピーク波長を調節することができる。この結果、より高解像度の回路パターンを確実に転写することができる。

- 10      この発明の別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、シンクロトロン放射源と、複数のX線ミラーを含みそのシンクロトロン放射源から出射される放射光が入射するX線ミラー群とを備える。X線ミラーは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向と、X線ミラー群から出射する反射光の出射方向とがほぼ同一である。

- 20      このため、従来X線露光に用いられると考えられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を含むシンクロトロン放射光を容易に得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域の放射光(X線)を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

- 25      また、本発明によるシンクロトロン放射装置のX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば高いスループットを得ることができる。また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えるこ

とができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

5 また、シンクロトロン放射源からの放射光の出射方向とX線ミラー群からの放射光の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節すれば、任意の波長のX線を得ることができる。

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、X線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一であってもよい。

10 この場合、シンクロトロン放射源からの放射光の出射光軸とX線ミラー群からの放射光の出射光軸とをほぼ同一に保持した状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有する放射光（X線）を得ることができる。

15 上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーがミラー材料としてベリリウムを含んでいてもよい。また、X線ミラーが3枚の平面ミラーを含んでいてもよい。

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーがミラー材料としてロジウムを含んでいてもよい。

20 上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、ベリリウムを含む3枚の平面ミラーと、ロジウムを含む拡大ミラーおよび集光ミラーとを含んでいてもよい。

25 この発明のさらに他の局面におけるシンクロトロン放射方法は、シンクロトロン放射源と、複数のX線ミラーを含みそのシンクロトロン放射源から出射される放射光が入射するX線ミラー群とを備えるシンクロトロン放射装置を用いたシンクロトロン放射方法であって、シンクロトロン放射源から出射した放射光を、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーに入射させる放射光入射工程と、X線ミラー群から、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向とほぼ同一の方向に反射光を出射する反射光出射工程とを備

える。

このため、従来X線露光に用いられると考えられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を含むシンクロトロン放射光を容易に得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射方法をX線露光工程に適用すれば、従来よりも短波長領域の放射光（X線）を利用することができる。そのため、  
5 従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

また、本発明によるシンクロトロン放射方法におけるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射方法をX線露光工程に適用すれば高いスループットを得ることができる。また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光  
10 工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

また、シンクロトロン放射源からの放射光の出射方向とX線ミラー群からの反射光の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節すれば、任意の波長のX線を得ることができる。

上記さらに他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、X線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一であってもよい。  
20

この場合、シンクロトロン放射源からの放射光の出射光軸とX線ミラー群からの反射光の出射光軸とをほぼ同一に保持した状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有する放射光（X線）を容易に得ることができる。  
25

この発明のさらに別の局面におけるX線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体とを備える。メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一



方においてのみ吸収端を有する材料を含み、X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む。

ここで、従来のX線マスクは、主にシリコン系の材料を用いていた。そして、これらのシリコン系の材料は、0.67 nm付近の波長領域において吸収端を有していた。このため、0.7 nm以下という波長領域のX線をX線露光の露光光として用いる場合には、十分な照射強度を得ることは難しかった。

しかし、本発明によるX線マスクでは、メンブレンとして0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域に吸収端を有さない材料を用いることにより、0.7 nm以下のX線を露光光として用いる場合に、従来のX線マスクよりも十分な照射強度を得ることができる。この結果、高いスループットを実現することができる。

また、X線吸収体として、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料、より好ましくは、ピーク露光波長より少し長波長側に吸収端を有する材料を用いることにより、主要露光波長領域において、X線吸収体の膜厚を薄くしても、十分なコントラストを得ることができる。これは、以下のような理由による。つまり、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15 nm程度の波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45 nm以上0.7 nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。この結果、X線吸収体の厚みを小さくすることができる。その結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。そのため、導波管効果などの影響を低減できるので、高解像度の回路パターンを転写することができる。

上記さらに別の局面におけるX線マスクでは、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

上記さらに別の局面におけるX線マスクでは、メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

この場合、メンブレンとしてダイヤモンドなどの0.45 nm以上0.7 nm以

下の波長領域に吸収端を有さない材料を用いることにより、0.7 nm以下のX線を露光光として用いる場合に、従来のX線マスクよりも十分な照射強度を得ることができる。この結果、高いスループットを実現することができる。

5 上記さらに別の局面におけるX線マスクでは、X線吸収体が、第1層と、第1層上に形成された第2層とを含んでいてもよい。

この場合、X線吸収体を複数の層により構成することで、X線吸収体として、複数の材料を用いることができる。このため、X線マスクの設計の自由度を大きくすることができる。

10 また、X線の吸収ピーク波長のそれぞれ異なる材料をX線吸収体として用いれば、単一の材料をX線吸収体として用いる場合よりも、より薄い膜厚で必要な波長領域のX線を遮断することができる。この結果、従来よりX線吸収体の膜厚を小さくすることができる。

この発明のさらにもう1つの局面におけるX線露光装置は、上記さらに別の局面におけるX線マスクを含む。

15 このため、0.7 nm以下のX線を露光光として有効に利用することができるので、高解像度の回路パターンを転写できると同時に、高いスループットを実現することができる。

この発明のもう1つ別の局面における半導体装置は、上記もう1つの局面におけるX線露光方法を用いて製造される。

20 この場合、上記のように本発明によるX線露光方法を用いれば、従来より高解像度の回路パターンを転写することができるので、従来よりさらに高集積化された半導体装置を得ることができる。

25 この発明のまた別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーを備える。

この場合、従来X線露光などのために用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写

することが可能となる。

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、X線露光工程において高いスループットを得ることができる。

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

この場合、0.3 nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、X線露光に本発明によるシンクロトン放射装置を用いた場合、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置は、前記X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

この場合、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも、より短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをシンクロトン放射装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。このため、本発明によるシンクロトン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、上記X線ミラーが、X線について0.45 nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

- 5       この場合、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、0.45 nm以上0.7 nm以下という波長領域のX線をほとんど本発明によるX線ミラーは吸収しない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

- 15       この場合、基板として、加工が容易な材料を用いることにより、この基板を予め球面などX線ミラーに必要な形状となるような加工を施すことができる。この結果、容易に大型でかつ複雑形状のX線ミラーを作製することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、X線を集光する機能を有していてもよい。

- 20       この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線を集光する機能も兼ね備えるので、シンクロトロン放射装置の構造をより簡略化することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい。

- 25       この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線ミラーから出射するX線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、シンクロトロン放射装置の構造をより簡略化することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線を集光する集光ミラーをさらに備えていてもよい。

この場合、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に調整できるの

で、より細かな設定を行なうことができる。

また、このように、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とするため、従来のシンクロトロン放射装置にこの短波長カット用のX線ミラーを挿入することにより、従来のシンクロトロン放射装置を、容易に本発明  
5 によるシンクロトロン放射装置へと改造することが可能となる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いることができると同時に、本発明によるシンクロトロン放射装置を実現するためのコストを低減することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーから出射  
10 するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラーをさらに備えていてもよい。

この場合、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

また、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とすることにより、従来のシンクロトロン放射装置に、本発明による短波長カット用の  
15 X線ミラーを挿入することにより、容易に本発明によるシンクロトロン放射装置を実現することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置を実現するためのコストを削減することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーにおける  
20 X線が入射する面は、機械的に研磨されていてもよい。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、化学的に研磨されていてもよい。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、X線マスクをさらに備えていてもよい。X線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線  
25 吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

この場合、本発明によるX線マスクのメンブレンとして用いる材料は、従来のメンブレンとして用いられていたシリコン系の材料のように、0.67nm付近

の波長領域において吸収端を有していないので、0.45 nm以上の波長領域におけるX線のトータルでの透過率を従来よりも高くすることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、より確実に露光工程に要する時間を従来よりも短縮することができるので、露光工程のスループットを従来よりも高くすることができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線マスクを備えていてもよく、そのX線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15 nmという波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45 nm以上0.7 nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来のX線露光工程よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

この場合、X線吸収体が複数の層から構成されるので、X線吸収体として用いられる材料の選択の自由度を大きくすることができる。

- 5      また、X線について吸収ピーク波長の異なる複数の材料をX線吸収体として用いることができるので、広い波長領域のX線を吸収しなければならない場合に、単一の材料を用いた1層のX線吸収体を形成する場合よりも、X線吸収体の膜厚を薄くすることが可能となる。

- 10      上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、第1層に含まれる第1材料が、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい。

この場合、第1および第2材料のように原子量の異なる元素を含み、複数の層を形成することにより、各層ごとにX線の吸収ピーク波長を変えることができるので、より広い波長範囲にわたって確実にX線を吸収することができる。

- 15      また、第1材料としてモリブデンやロジウムなどの原子量の大きな重元素を用いてもよい。また、第2材料として、炭素やベリリウムなどの原子量の小さい軽元素を用いてもよい。

- 20      このように、重元素と軽元素とを積層するようなX線吸収体を形成することにより、より確実にX線を吸収することができる。そのため、X線の遮光能力をほぼ同等にする場合には、従来よりもよりX線吸収体の膜厚を薄くする事が出来る。この結果、X線吸収体に形成される、転写用パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このようにアスペクト比を小さくできるので、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、転写用パターンを容易に形成することができると同時に、高い転写精度を実現することができる。

- 25      上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、X線ミラーを複数備えていてもよい。

この場合、露光に用いるX線の光軸の設定など、シンクロトロン放射装置の設計の際の自由度を大きくすることができる。また、複数の短波長カット用のX線ミラーを用いることにより、より確実に、露光に用いるX線から短波長のX線を

除去することができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーを、2枚以上4枚以下備えていてもよい。

5 この場合、2枚のX線ミラーを用いる場合には、このX線ミラーへのX線の斜入射角を調整することにより、この2枚のX線ミラーに入射する前のX線の進行方向と、2枚のX線ミラーから最終的に出射されるX線の進行方向とをほぼ平行にすることができる。また、X線のX線ミラーに対する入射方向とX線ミラーの反射面との角度を調節することにより、露光に用いるX線のピーク波長を調節することができる。

10 また、3枚もしくは4枚のX線ミラーを用いれば、X線ミラーにおけるX線の斜入射角とX線ミラーから最終的に出射されるX線の光軸の位置とを独立して調節することができるので、シンクロトロン放射装置の設計の自由度をより大きくすることができる。

15 また、従来のシンクロトロン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入する場合には、従来のX線の光軸を変更することなく、本発明によるX線ミラーを従来のシンクロトロン放射装置に組込むことが可能となる。

また、4枚のX線ミラーを用いる方が、2枚のX線ミラーを用いる場合よりも、変更することができるX線の波長領域をより広くすることができる。

20 上記一局面におけるシンクロトロン放射装置では、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

25 この場合、X線の入射方向とX線の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができるので、X線の出射方向を変化させることなく、任意の波長のX線を得ることができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

この場合、X線の出射方向を変化させることなく（X線の進行方向を一定に保



った状態で)、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度(斜入射角)を任意に選択することができる。この結果、斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

- 5      上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

10      この場合、入射光軸と出射光軸とをほぼ同一とした状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

- 15      この場合、X線の入射光軸と出射光軸とをほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置および斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更することが可能であってもよい。

- 20      この場合、X線マスクの材質や、転写される回路パターンに要求される解像度、また、レジストの特性などに、より適合するようにX線のピーク波長を調節することができる。この結果、従来よりもより微細な回路パターンを精度よく形成することが可能となる。

25      この発明のその他の局面におけるシンクロトロン放射方法は、シンクロトロン放射源からX線を出射するX線出射工程と、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーに前記X線を入射させるX線入射工程とを備える。

この場合、従来用いられていた0.75nm程度の波長よりも短波長領域のX

線をシンクロトン放射源から取り出すことができるので、この短波長領域のX線をX線露光工程において容易に利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

5 また、本発明におけるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、X線露光工程において確実に高いスループットを得ることができる。

10 また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

15 上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含んでいてもよい。

この場合、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

20 上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

25 この場合、波長が0.7 nmよりも大きいX線を利用していた従来のシンクロトン放射方法よりも、より短波長領域のX線を利用することができる。この結果、露光に用いるX線の波長が短くなることにより、従来よりも高い解像度を有する回路パターンを転写することができる。

また、X線の波長が短くなることにより、X線の照射強度を大きくすることができるので、従来よりも高いスループットを得ることができる。

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線ミラーがX線に

ついて0.45nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

この場合、本発明によるシンクロトロン放射方法において用いるX線ミラーは、0.45nm以上という波長領域において吸収端を有さない。この結果、0.45nm以上という波長領域においてX線ミラーによりX線が吸収される吸収ピークが存在しないので、より確実にX線の照射強度を確保することができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

この場合、基板をX線ミラーに要求される形状に予め加工しておくことができるので、複雑な形状のX線ミラーを容易に得ることができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いてX線を集光する工程を含んでいてもよい。

この場合、X線ミラーを用いて、短波長のX線をカットする工程とX線を集光する工程とを同時に行なうことができるので、本発明によるシンクロトロン放射方法を行なうシンクロトロン放射装置の構造を簡略化することができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい。

この場合、X線ミラーが、短波長カット機能とX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能とを兼ね備えるので、本発明によるシンクロトロン放射方法を行なうシンクロトロン放射装置の構造を簡略化することができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、集光ミラーを用いてX線をさらに集光する工程を含んでいてもよい。

このため、短波長カット用のX線ミラーと集光ミラーとを独立して用いるので、従来のシンクロトロン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、

容易に本発明によるシンクロトロン放射方法を実施することができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、拡大ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい。

- 5       この場合、短波長カット用のX線ミラーと拡大ミラーとを独立して用いるので、従来のシンクロトロン放射方法を行なうためのシンクロトロン放射装置に、本発明によるX線ミラーを挿入することで、容易に本発明によるシンクロトロン放射方法を実施することができる。

- 10       上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が機械的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が化学的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

- 15       上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

- 20       ここで、本発明によるX線マスクのメンブレンにおいて用いる材料は、従来のメンブレンに用いられていたシリコン系の材料とは異なり、0.67 nm付近の波長領域に吸収端を有さない。このため、従来より短波長領域である0.7 nm以下の波長を有するX線を露光工程において用いる場合に、メンブレンにおいてこれらのX線が吸収されることを防止できる。この結果、十分な露光量を確保することができる。このため、従来のX線マスクを用いる場合よりも、X線のメンブレンにおける透過率を高くすることができるので、高いスループットを確保す  
25       ることができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸

収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

5 この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、本発明によるシンクロトロン放射方法をX線露光工程に適用すれば、従来より短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15 nmという波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45 nm以上0.7 nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを従来より小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、本発明によるシンクロトロン放射方法をX線露光方法に適用すれば、従来のX線露光工程よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

15 上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

20 上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

この場合、X線吸収体において複数の層を形成するので、X線吸収体として用いる材料の自由度をより大きくすることができる。また、X線の吸収ピーク波長の異なる材料を組合せてX線吸収体を形成すれば、単一材料を用いてX線吸収体を形成する場合よりも、より薄い膜厚のX線吸収体により確実にX線を遮蔽することができる。

25 上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、第1層に含まれる第1材料は、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していて

もよい。

また、第1材料として、モリブデンもしくはロジウムなどの比較的原子量の大きな重元素を用いてもよく、第2材料として炭素もしくはベリリウムなどの比較的原子量の小さな軽元素を用いることが好ましい。このように、X線の吸収ピーク波長が異なる材料を用いることにより、よりX線吸収体の膜厚を薄くすることができる。

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーを用いてもよい。

この場合、複数のX線ミラーを用いることにより、X線ミラーでのX線斜入射角や出射光軸を設計する際の自由度を大きくすることができる。

また、複数のX線ミラーを用いることにより、より確実に短波長領域のX線をカットすることができる。

上記その他のシンクロトン放射方法では、X線入射工程において、2枚以上4枚以下のX線ミラーを用いてもよい。

この場合、たとえば2枚のX線ミラーを用いる場合には、X線ミラーの位置、およびX線のX線ミラーに対する斜入射角を調節することにより、X線のX線ミラーからの出射方向を一定に保った状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を任意に設定することができる。この結果、X線のピーク波長を任意に変更することができる。

また、X線ミラーを3枚もしくは4枚用いれば、X線の光軸を変えることなく、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができる。このため、従来のシンクロトン放射方法が行なわれていたシンクロトン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、本発明によるシンクロトン放射方法を容易に行なうことが可能となる。

また、3枚もしくは4枚とX線ミラーの枚数を増やせば、X線のピーク波長を調節することが可能な波長領域の幅をより広くすることができる。

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するXミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入

射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

この場合、X線ミラーの位置およびX線に対する角度を調節することにより、X線の出射方向を入射方向とほぼ同一にした状態で、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

- 5      上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

この場合、X線の出射方向と入射方向とをほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線をより確実に得ることができる。

- 10      また、X線ミラーにおけるX線の入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を調節することにより、X線のピーク波長を調節することができる。

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

- 15      この場合、X線の出射光軸と入射光軸とをほぼ同一にした状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を調節すれば、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

- 20      上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

この場合、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

- 25      上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更する工程をさらに備えていてもよい。

この場合、シンクロトロン放射方法において用いるX線マスクや、転写回路パターンに要求される解像度および半導体基板上に塗布されているレジストなどの

特性に適應するように、X線のピーク波長を調節することができる。この結果、本発明によるシンクロトン放射方法により得られるX線をX線露光工程に適用すれば、より高解像度の回路パターンを確実に転写することができる。

## 5 図面の簡単な説明

図1は、本発明によるX線露光装置の実施の形態1を示す模式図である。

図2は、本発明の実施の形態1～4におけるX線ミラーの材料についての、X線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

10 図3は、本発明の実施の形態5におけるX線ミラーの材料についてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

図4は、本発明の実施の形態6におけるX線ミラーの材料についてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

図5は、本発明の実施の形態7におけるX線マスクのメンブレン材料についてのX線の波長とX線の透過率との関係を示すグラフである。

15 図6は、本発明の実施の形態8において得られるX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

図7は、本発明の実施の形態9において得られるX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

20 図8は、本発明の実施の形態10において、本発明によるX線ミラーを2枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

図9は、本発明の実施の形態11において、本発明によるX線ミラーを3枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

図10は、図9に示した系により得られるX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

25 図11は、本発明の実施の形態12において、本発明によるX線ミラーを4枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

図12は、本発明の実施の形態13において、本発明によるX線ミラーを4枚用いた系における制御方法を示す模式図である。

図13は、図12に示した系において得られるX線の波長と相対強度との関係



を示すグラフである。

図 1 4 は、本発明の実施の形態 1 4 における X 線マスクを示す断面模式図である。

5 図 1 5 は、X 線マスクの X 線吸収体として用いられる材料についての X 線の波長と X 線の透過率との関係を示すグラフである。

図 1 6 は、本発明による X 線露光システムの概略図である。

図 1 7 は、図 1 6 における X 線マスクと半導体ウェハとを示す部分拡大断面図である。

10 図 1 8 は、ベリリウムからなるミラーとロジウムからなるミラーとを備えるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

図 1 9 は、ベリリウムからなるミラーと白金からなるミラーとを備えるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

15 図 2 0 は、X 線マスクを透過した後の X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

図 2 1 は、本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

20 図 2 2 は、本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

図 2 3 は、本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

図 2 4 は、従来の X 線露光装置の構成図である。

25 発明を実施するための最良の形態

以下、図面に基づいて本発明の実施の形態を説明する。

(実施の形態 1)

本発明は、基本的にはシンクロトロン放射源から X 線露光に最適な従来より短波長領域の X 線を取り出す装置および方法と、取り出された X 線を露光光として

利用するためのX線マスクとから構成されている。図1は、本発明によるX線露光装置の実施の形態1を示す模式図である。図1を参照して、X線露光装置は、シンクロトロン放射源1とX線ミラー3と熱除去フィルタ4とベリリウム窓5とX線マスク6とを備える。ここで、熱除去フィルタ4はベリリウムからなり、長波長領域のX線をカットする機能を有する。また、ベリリウム窓5は、真空領域と大気との隔壁として作用する。X線マスク6には、半導体ウェハ9に転写されるべき転写用回路パターンがX線吸収体により形成されている。

シンクロトロン放射源1から出射した放射光2は、X線ミラー3にまず入射する。このときの放射光2の光軸とX線ミラーのX線を反射する面とのなす角を斜入射角7としている。また、X線ミラー3において放射光2を集光する角度を集光角8として示している。そして、X線ミラー3において反射された放射光2は、熱除去フィルタ4、ベリリウム窓5、X線マスクを介して、半導体ウェハ9に到達する。このような反射光2を利用したX線露光方法を用いて、半導体装置を製造することができる。

なお、X線ミラー3は、放射光2を集光する集光ミラーとしての機能や、X線ミラー3から出射する放射光2が一度に照射できる領域の面積（照射面積）を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えていてもよい。また、本発明によるX線露光装置は、X線ミラー3とは別に、集光ミラーや拡大ミラーを備えていてもよい。

ここで、本発明によるX線露光装置では、X線ミラー3として、シリコンウェハを基板とし、この基板表面に、プラズマCVD法を用いて50 $\mu$ mの膜厚のダイヤモンド層を形成したものをを用いた。このダイヤモンド層の表面は機械的に研磨加工されることにより、表面粗度が0.4nm（rms）となっている。なお、ダイヤモンド層の表面は、化学的に研磨加工されていてもよい。

そして、このような構造を有するX線ミラー3に対して、斜入射角1°という条件で放射光2を入射し、X線ミラー3のX線反射特性（短波長領域のX線をカットする特性）を評価した。その結果を図2に示す。図2は、X線ミラーの材料についての、X線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

ここで、発明者らは、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において用

いることができることを発見した。そして、このような短波長領域のX線を用いたX線露光装置を実現するために、さまざまな検討を行なった。そして、この検討の1つとして、短波長領域のX線を用いた露光に最適なX線を取り出すため、シンクロトロン放射源からX線を取り出すためのビームラインに用いる短波長カット用のX線ミラーの材料について検討を行なった。

発明者らは、まず、各種材料表面でのX線の反射特性を検討した。この結果、従来からX線ミラーとして検討されている金や白金などの重元素を用いたミラーにおいても、斜入射角を小さくすることにより、カットされるX線の波長領域を従来よりも短波長領域へと移動させることがある程度は可能であることを確認した。しかし、従来の金や白金などを用いた場合には、0.3～0.5 nmといった波長領域のX線を完全にカットすることはできず、X線ミラーから出射されるX線には、この0.3～0.5 nmという波長領域のX線がかなりの割合で混入していた。このような波長領域のX線が露光に用いるX線に混入することにより、半導体ウェハ上に塗布されたレジストにX線が入射した際、従来よりも多くの光電子を発生させるので、形成されるパターンの精度に悪影響を及ぼす。

そこで、発明者らは、このような問題を解決するため、X線ミラーの反射面の材料として、ダイヤモンドや窒化硼素などの、高密度でありかつ原子量も小さい軽元素を含む材料を用いることを考案した。

ダイヤモンドや窒化硼素をX線ミラーとして用いる場合には、斜入射角を1°と大きくした場合にも、0.6 nm程度の短波長領域まで、X線を高い反射率で反射することがわかった。そして、0.6 nm以下の短波長領域においては、これらの材料を用いたX線ミラーでは、X線の反射率が急激に低下する。このため、このような短波長領域でのX線の混入を従来の金や白金などを用いた場合よりも小さくすることができる。

また、図2を参照して、ダイヤモンドおよび窒化硼素のいずれを用いたX線ミラーにおいても、ほぼ同程度の高い反射率が得られる。

また、斜入射角を1°以下というより小さい角度にすることにより、ダイヤモンドや窒化硼素を用いたX線ミラーでは、X線ミラーにおいてカットする波長領域をより短波長側へと移動させることが可能であった。

また、これらの軽元素からなる材料においては、一度 0.6 nm 程度の波長領域において X 線の反射率が低下した後は、0.45 nm 未満の短波長領域において反射率が低下したままでほとんど変動しない。このように反射率の変動がないため、放射光から 0.45 nm 未満の短波長領域に属する X 線を従来よりも効果的に除去することができる。つまり、これらの材料を利用すれば、波長が 0.45 nm 未満のみの X 線を吸収する短波長カット用の X 線ミラーを作成することが可能となる。

また、上記のような軽元素からなる材料は、0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域に吸収端を有さない。このため、上記材料は上記のような波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、これらの材料を X 線ミラーに適用すれば、従来の X 線ミラーよりも、0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域の X 線をより確実に反射することができる。その結果、十分な X 線の照射強度を確保することができるので、高いスループットを得ることができる。

また、上記の材料を X 線ミラーに適用すれば、従来用いられていた 0.75 nm 程度の波長よりも短波長領域の X 線を得ることができる。この結果、従来より短波長領域の X 線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。この結果、本発明による X 線露光装置を用いれば、従来よりさらに高集積化された半導体装置を得ることができる。

また、これらのダイヤモンドや窒化硼素などの材料を研磨した平滑な表面を X 線の反射面として用いることにより、約 90% 程度と、高い反射率を得ることができた。

また、ここで、従来の X 線ミラーについては、平面ミラーや球面ミラー、あるいは非球面ミラーといった形状が提案されている。球面ミラーとしては、シリンドリカルタイプやトロイダルタイプなどが提案されている。また、非球面ミラーとしてはエリプソイダルタイプ、パラボロイドタイプなどが提案されている。これらはいずれも集光効率を高める目的のために考案されたものである。また、加工技術および評価技術さらには設計技術の進歩により、最近では数式で表記できないような非球面のミラー面も検討されてきている。

また、X 線ミラーの基板としては、ガラスのみでなく、高い硬度を有するが脆

いため、従来は加工に適さないと考えられていたような材料を用いることも検討されてきている。これは、加工技術の進歩により、このような高硬度の材料を用いて、自由曲面を形成することが可能になってきたことによる。

5 このため、発明者らは、従来からX線ミラーの材料として検討されていた熔融石英などの酸化珪素系の材料のほか、炭化珪素、グラファイト、窒化硼素などの材料によってもX線ミラーの加工を試みた。そして、これらの炭化珪素、グラファイト、窒化硼素により形成したX線ミラーによっても、斜入射角を調節することにより、0.6 nm前後の領域以下の短波長領域のX線をカットすることができた。しかし、炭化珪素やグラファイトを用いたX線ミラーにおいては、斜入射角を大変小さくする必要があった。また、X線ミラーの反射面としてダイヤモンド薄膜を形成した面を用いることも検討した。

15 ここで、炭化珪素やダイヤモンド材料の形成技術については、近年、CVD法を用いた形成技術の開発が急速に進んでいる。そのため、従来よりもより大きな炭化珪素やダイヤモンド材料からなる試料を得ることが可能になってきている。このため、この炭化珪素などの材料を、X線ミラーの材料として検討することが可能になってきた。

20 ダイヤモンド材料からなるバルク材を用いてX線ミラーを形成することができれば、その熱伝導特性などから考えて、良好な特性を有するX線ミラーを得ることができると考えられる。しかし、これらの材料を用いてバルク状の大型ミラーを形成することは工業的にはまだ困難である。そのため、発明者らは、これらの材料を用いて小型の平面ミラーを作製し、その特性を検証した。そして、その特性は予測どおり優れたものであった。

25 発明者らは、上記の炭化珪素やダイヤモンド材料などを用いたX線ミラーの検討に際しては、作製工程の容易さなどから、これらの材料をCVD法を用いて薄膜として形成した。そして、この薄膜表面をX線ミラーの反射面として用いることを主に検討した。すなわち、既に所定形状に加工した基板表面に、CVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成する。そして、機械的あるいは化学的な加工を施し、X線ミラーを完成した。

ここで、X線ミラーの基板としては、比較的加工が容易なグラファイトなどの

炭素系材料、珪素酸化物を主体とした結晶やガラス系の材料、加工は困難になるが熱伝導性や照射損傷に対する耐性などの観点から選択された炭化珪素系の材料、および硬度が高く耐熱性に優れるが、比較的脆い窒化硼素などの材料について検討した。そして、これらの材料の表面にCVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成した。

具体的には、発明者らは、グラファイト、珪素酸化物、炭化珪素、窒化硼素などの基板を約700℃以上に加熱した状態で、CVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成した。この結果、グラファイト、珪素酸化物、炭化珪素、窒化硼素のいずれの材料の表面においても、ダイヤモンド薄膜を形成することが可能であった。

また、発明者らは、ダイヤモンド薄膜の形成条件について、形成されたダイヤモンド薄膜の表面の平滑性を向上させるため、CVD法のプロセス条件や、基板表面のダイヤモンド生成の発生核密度を増加させるといった基板処理条件などを検討した。しかし、CVD法で形成したダイヤモンド薄膜をそのままX線ミラーとして用いた場合には、十分満足できる程度の特性を得ることは困難であった。

このため、発明者らは、基板材料上にダイヤモンド薄膜を形成した後、ダイヤモンド薄膜の表面について、研磨などの加工を施す方法を試みた。加工方法としては、機械的加工による研磨を主に検討した。また、加工時間の短縮などを目的として、化学的研磨についても加工条件の探索を行なった。しかし、機械的加工および化学的加工のいずれの方法を用いても、ダイヤモンド薄膜の表面の加工は困難であった。

一方で、グラファイトをX線ミラーとして用いた場合には、斜入射角を非常に小さくする必要があった。そこで、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)と呼ばれる材料をX線ミラーのX線の反射面に用いることを検討した。ダイヤモンドライクカーボンを用いた場合には、ダイヤモンド薄膜に近いX線の反射特性を得ることができた。また、ダイヤモンドライクカーボンは、ダイヤモンド薄膜の製造プロセス条件と類似したプロセス条件であって、より広い条件において薄膜を形成することが可能であった。

また、ここでは、シリコン基板上にCVD法で窒化硼素の薄膜を形成したX線

ミラーも作製した。この窒化硼素の薄膜を有するX線ミラーについても、斜入射角 $1^{\circ}$ という条件で反射特性を評価した。その結果も図2に示す。

図2を参照して、ダイヤモンド薄膜を有するX線ミラーは、X線の波長が0.6 nm付近を境にして、0.6 nm以下の短波長領域に属するX線の反射率が急激に低下している。このため、このX線ミラーを用いれば、0.7 nm以上という波長領域のX線を用いていた従来のX線露光装置よりも、より短波長のX線を得られることがわかる。

また、窒化硼素を用いたX線ミラーについても、反射率が向上する波長の位置はダイヤモンドを用いたX線ミラーよりわずかに長波長側であるが、やはり同様に0.6 nm以上の波長を有するX線を得ることができる。

#### (実施の形態2)

本発明の実施の形態1と同様に、シリコン基板上に気相合成法を用いてダイヤモンドライクカーボンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。このダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射特性を、本発明の実施の形態1と同様に評価した。その結果を図2に示す。

図2を参照して、ダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射特性は、ダイヤモンドを用いたX線ミラーの反射特性と基本的には類似している。ただし、ダイヤモンドライクカーボンの平均密度は3.32であり、ダイヤモンドの平均密度である3.52よりわずかに低い。このため、X線ミラーに対するX線の斜入射角をすべてのX線ミラーについて $1^{\circ}$ としたこの実施の形態2における測定結果においては、ダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射率の立上がり波長は、ダイヤモンドを用いたX線ミラーの場合よりも長波長側にシフトしている。

そして、上記のダイヤモンドやダイヤモンドライクカーボンなどのように、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料をX線ミラーの材料として用いれば、0.7 nm以下の波長領域においてX線の照射強度が低下したり、変化するという問題の発生を防止できる。この結果、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従

来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

5      なお、比較例として炭化珪素を用いたX線ミラーについての反射特性データも図2に示している。図2からもわかるように、炭化珪素を用いたX線ミラーでは、0.6 nm付近の波長領域において吸収端が存在するため、この波長領域で一度反射率が低下している。この結果、本発明によるX線ミラーに比べて炭化珪素を用いたX線ミラーは、0.7 nm以下の波長領域においてX線の照射強度が低下することがわかる。

10      また、図2を参照して、本発明によるX線ミラーの材料であるダイヤモンドなどでは、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収していることがわかる。

このため、本発明によるX線ミラーを用いれば、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを、確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

15      （実施の形態3）

ゲルマニウムを基板として、この基板表面にスパッタ法を用いて金属チタンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。この金属チタンの薄膜の膜厚は約0.5  $\mu$ mである。この金属チタンを用いたX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に反射特性を評価した。その結果を図2に示す。

20      図2を参照して、X線ミラーに対するX線の斜入射角を1°とした場合、この金属チタンの薄膜を用いたX線ミラーは、基本的には本発明の実施の形態1におけるダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーと同様の反射特性を示している。ただし、金属チタンの薄膜を用いたX線ミラーは、ダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーよりも長波長領域でのX線の反射率が低くなっている。

25      （実施の形態4）

金属、合金あるいはセラミックを基板として用い、この基板上にイオンプレーティング法を用いて窒化チタンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。ここでは、炭化珪素を基板として用い、この炭化珪素からなる基板上に窒化チタンの薄膜を形成したX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に



反射特性を評価した。

また、ベリリウムを機械的に加工することにより、X線ミラーを形成した。これらの窒化チタンを用いたX線ミラーとベリリウムを用いたX線ミラーとの反射特性の評価結果を、図2に示す。

- 5      図2を参照して、窒化チタンを用いたX線ミラーは、斜入射角を $1^\circ$ とした場合、チタンを用いたX線ミラーよりも反射率の立上がり波長が短波長側へとシフトし、かつ、チタンを用いたX線ミラーよりも高い反射率を示した。

- 10      また、ベリリウムを用いたX線ミラーは、 $0.8\text{ nm}$ 以上の波長を有するX線に対し、高い反射率を示した。なお、図2に示すように、他の材料と同様に、ベリリウムは反射率が低下した後、短波長領域においてはその反射率は安定している。このため、ベリリウムをX線ミラーの材料として用いることで、他の材料と同様に効果的に短波長領域のX線を除去することができる。また、 $0.8\text{ nm}$ 以上の波長領域における高い反射率から考えると、X線ミラーの材料としては優れた特性を有しているといえる。

- 15      しかし、ダイヤモンド薄膜や窒化硼素などを用いたX線ミラーと同様のカット波長を実現するためには、 $1^\circ$ よりもさらに小さな斜入射角とする必要がある。このため、大きな斜入射角においては用いることができないので、X線を集光する集光ミラーとしての機能を考えた場合には、ダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーよりもトータルの特性としては劣っているといえる。そして、このベリリウムを用いたX線ミラーをX線露光装置において用いる場合に、高いスループットを実現するためには、このX線ミラーの枚数を増加するなどの対応が必要となると考えられる。

- 20      このように、短波長カット用のX線ミラーとして、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素などの表面を用い、このX線ミラーへのX線の入射角を調整することにより、従来最適露光波長であるとされていた $0.7\text{ nm}$ よりも短波長の領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。この結果、従来より短波長のX線を用いた近接露光工程に使用することができるX線を取り出すことができる。

このため、従来より短波長のX線を露光工程に利用できるのも、従来よりも高

い解像度を有する回路パターンを転写することができる。また、X線の照射強度も大きくできるので、高いスループットを実現することができる。

5 また、基板材料上にダイヤモンドなどのミラー材料を形成するので、基板材料を予め球面などのX線ミラーとして必要な形状となるように加工しておくことができる。この結果、容易に大型でかつ複雑形状のX線ミラーを得ることができる。

また、本発明によるX線露光装置においては、上記のようなX線ミラーを用いることにより、0.3～1.5 nm程度の範囲の波長を有するX線を露光光として用いることが可能となる。

#### 10 (実施の形態5)

X線ミラーの基板として炭化珪素あるいは酸化珪素を用い、この基板表面を研磨した。その後、この研磨面に電子線蒸着法を用いてルテニウムの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。また、基板の研磨面に電子線蒸着法を用いてロジウムの薄膜を形成することにより、もう1つのX線ミラーを作製した。

15 そして、このルテニウムとロジウムとを用いたX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様にX線についての反射特性を評価した。なお、この実施の形態5においては、斜入射角を変化させ、この斜入射角と反射特性との関係についても評価した。その結果を図3に示す。図3は、X線ミラーについてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。なお図3においては、比較例として白金を用いたX線ミラーについての反射特性の測定結果も同時に示している。

20

ここで、ルテニウムにおいては、K吸収端が0.056051 nmと短波長領域に存在し、L吸収端が0.4180 nmと0.4369 nmとに、またM吸収端が4.43 nmに存在する。また、ロジウムにおいては、K吸収端が0.053392 nmに存在し、L吸収端が0.3629 nm、0.3925 nmおよび

25 0.41299 nmに、またM吸収端が4.04 nmに存在する。

このようなL吸収端の影響により、図3を参照して、ルテニウムを用いたX線ミラーおよびロジウムを用いたX線ミラーのいずれのデータにおいても、X線の波長が0.4 nm付近という領域において、X線の反射率が変動する領域が存在する。しかし、0.45 nm以上の波長領域におけるX線ミラーからの反射光に

おいては、これらの吸収端の影響は少なく、良好な特性のX線を得ることができる。つまり、X線について0.45nm未満0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料（0.45nm以上0.7nm以下の波長領域には吸収端を有さない材料）である、ルテニウムやロジウムをX線ミラーの材料として用いれば、0.45nm以上という波長領域のX線をほとんど吸収しない本発明によるX線ミラーを容易に形成することができる。そして、本発明によるX線ミラーは、従来のX線ミラーよりも、0.45nm以上の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。

- 10       そして、X線のX線ミラーに対する斜入射角を1.5°から1.0°へと小さくすれば、得られるX線のピーク波長をより短波長側へと移動させることができる。このようなX線ミラーを用いれば、ピーク波長を0.4nm台としたX線を容易に得ることができる。

- 15       ここで、図3を参照して、比較例として示した白金は、金などと同様に、K吸収端およびL吸収端が0.1nm程度以下と短波長領域に位置している。しかし、この白金は、さらに0.5nm台の波長領域にM吸収端が存在している。

- 20       このため、白金を用いたX線ミラーの反射特性を示すグラフは、0.5nm台の波長領域において反射率が低下している。そして、0.4～0.7nmという波長領域における反射率は、本発明によるルテニウムなどを用いたX線ミラーよりもはるかに小さいものになっている。また、白金を用いたX線ミラーでは、この波長領域における反射率がいくつかのピークを有しており、露光工程において用いる露光光としてはあまり良い特性を有しているとはいえない。また、トータルのX線の光量も本発明によるX線ミラーを用いた場合よりも少なくなっていることがわかる。

- 25       （実施の形態6）

X線ミラーの基板として炭化珪素を用い、この炭化珪素の反射面となる面を研磨する。そして、この基板の研磨面に、電子線蒸着法を用いて銀の薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。また、同様の基板を用いて、研磨面に電子線蒸着法を用いてパラジウムの薄膜を形成することにより、もう1つのX線ミ

ラーを作製した。そして、これらのX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に、斜入射角を $1^\circ$ とした場合の反射特性を評価した。その結果を図4に示す。図4は、X線ミラーについてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

5 図4を参照して、本発明によるX線ミラーである銀およびパラジウムを用いたX線ミラーは、およそ0.4 nm付近の波長領域において反射率の立上がりを行っている。そして、0.45～0.7 nmといった波長領域のX線については、安定した反射率をしている。このため、本発明による銀およびパラジウムを用いたX線ミラーを用いれば、本発明の実施の形態1～5と同様に、従来よりも短波  
10 長領域にピーク波長を有し、X線露光工程に適するX線を容易に得ることができる。

また、比較のために示した白金を用いたX線ミラーの反射特性と比較してもわかるように、従来の白金を用いたX線ミラーよりも、本発明によるX線ミラーの方が、0.45～0.7 nmという波長領域のX線に対しては、高い反射率を示  
15 していることがわかる。

なお、ここでは炭化珪素を基板材料として用いたが、酸化珪素を基板材料として用いた場合にも、同様の効果を得られる。

#### (実施の形態7)

本発明のように、従来よりも短波長のX線を用いて微細パターンを形成する場合  
20 には、X線マスクの基板材料におけるX線の透過性能も重要な特性の1つである。具体的には、X線マスクの基板材料において、X線の透過性能がX線の波長に対する依存性を有することが問題となる。

すなわち、従来からX線マスクの基板として検討されている窒化珪素や炭化珪素などの珪素を含む材料は、薄膜中の欠陥レベルなどを含め、実用に向けた完成  
25 度は非常に高く、この点においては好ましい材料である。しかし、珪素はX線についての吸収端が0.7 nm近辺の波長領域に存在するので、この波長領域近辺のX線に対して、急激な透過率の変化が発生する。この結果、本発明において使用しようとする短波長領域のX線を露光光として用いる場合には、従来の珪素を含む材料はX線マスクの基板として用いるには適しているとは言えなかった。

このため、発明者らは、珪素を含有しない薄膜をX線マスクの基板として用いることを検討した。具体的には、カーボンを主原料とする材料、窒化硼素およびベリリウムなどの軽元素で構成された薄膜を用いることを検討した。上記した材料はいずれも1.5 nm以下の波長において吸収端が存在せず、X線に対する良好な透過性能を示す。特に、ダイヤモンドはヤング率についても炭化珪素の2倍以上の値を示すなど、X線マスクの基板としての特性は極めて優れている。

また、ベリリウム薄膜は、X線の透過性能は極めて優れているものの、アライメント用の光についての透過性がなく、熱膨張係数も大きかった。このため、ベリリウム薄膜は、X線を用いた近接露光技術においては、X線マスクの基板としてほとんど検討されていなかった。

しかし、現在開発が進められている減圧ヘリウム雰囲気などの熱放散性のよい露光環境を用いること、およびフラッシュ露光のような大面積一括露光方式を用いることなどの条件下においては、露光工程におけるX線マスクの温度上昇は極めて小さいことがわかった。特に、熱線吸収用のダイヤモンド窓やベリリウム窓をX線露光装置において用いた場合には、X線マスクの温度上昇はほとんど無視し得る程度であった。この結果、ベリリウム薄膜の熱膨張係数が大きいという問題は、大きな障害とはならないことがわかった。

また、X線マスクのアライメント方式として、X線マスクを通して半導体ウェハ上に形成されたマークを検出するというような方式以外のアライメント方法、たとえばグローバルアライメント方式を用いる場合には、ベリリウム薄膜における光の透過性が悪いということは問題とならない。ここで、グローバルアライメント方式とは、たとえば、まずX線マスクとX線マスクのホルダとの位置を予め調整する。そして、ホルダと半導体ウェハとの位置を調節する。そして、露光ショットごとにX線マスクのアライメントは行なわず、ホルダの移動を精密に制御することにより、X線マスクと半導体ウェハとの位置合せを行なう方法などが該当する。

また、窒化硼素は、硬度や熱膨張係数の値などから考えると、ベリリウム薄膜よりもX線マスクの基板として優れている。しかし、ベリリウム薄膜と同様、アライメントに用いる光を透過する膜を形成することが困難であったため、従来は

X線マスクの基板材料としては検討されていなかった。しかし、ベリリウム薄膜の場合と同様に、グローバルアライメント方式を用い、半導体ウェハを保持するステージの位置精度の高精度化が進められた結果、この窒化硼素もX線マスクの基板材料として用いることが可能であることがわかった。また、窒化硼素は、本  
5 発明において露光光として用いるX線の0.5 nmという波長領域において、吸収端が存在しない優れた材料であることも明らかになった。すなわち、これらの材料は、本発明によるX線露光装置においては、X線マスクの基板材料として適用することが可能である。

このように、本発明によるX線露光装置において用いるX線マスクのメンブレ  
10 ン材料（ベリリウム、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素）について、X線の透過特性を評価した。その結果を図5に示す。

図5は、メンブレン材料についてのX線の波長とX線の透過率との関係を示すグラフである。また、比較のため、従来からX線マスクのメンブレンとして用いられる炭化珪素についても、同様にX線の透過特性を示した。図5を参照して、  
15 本発明によるX線マスクのメンブレン材料は、従来用いられていた炭化珪素よりも、0.45～0.7 nmという波長領域において優れたX線の透過率を示すことがわかる。

なお、各種材料についてのX線の透過特性の評価は、何点かの波長に対してトータル光量の測定を行ない、透過率のX線波長に対する依存性についての詳細な  
20 検討はシミュレーションにより行なった。

#### （実施の形態8）

以下、本発明によるX線ミラーを既存のX線露光装置に挿入することによっても、短波長領域のX線を確実にカットすることができるという効果を得ることが可能であることを説明する。

25 従来のX線露光装置の系として、臨界波長が0.7 nmというシンクロトロン放射源と、2枚の金を含むX線ミラーと、厚さ20  $\mu$ mのベリリウム窓とを備える系を考える。このシンクロトロン放射源から出射したX線は、斜入射角1.4°という条件で金を含むX線ミラーにおいて反射される。そして、その後、ベリリウム窓を透過することにより、長波長成分をカットする。このようにして得

られるX線のスペクトルを図6に示す。図6は、X線の波長とX線の相対強度との関係を示すグラフである。図6を参照して、図中の実線で示したグラフは上記の従来のX線露光装置において得られるX線のスペクトルを示す。

5       このような従来のX線露光装置に、まずダイヤモンドを含む本発明によるX線ミラーを、斜入射角が $1^{\circ}$ となる条件で挿入する。ここでは、本発明によるX線ミラーを1枚挿入した場合と、2枚挿入した場合との両方の場合について、X線のスペクトルをそれぞれ示している。

10       図6からもわかるように、従来の系においてベリリウム窓を透過した後も残存していた $0.55\text{ nm}$ 以下の短波長成分が、本発明によるX線ミラーを挿入することにより、ほとんどカットされていることがわかる。そして、本発明によるX線ミラーを2枚追加した場合には、本発明によるX線ミラーを1枚追加した場合に比べて、全体のX線の強度は若干弱くなるものの、ピーク波長をほぼ一定にしたまま、 $0.55\text{ nm}$ 以下の波長領域のX線の強度をより低減させることが可能であることがわかる。

15       （実施の形態9）

以下、本発明によるX線ミラーを用いて、露光に用いるX線のピーク波長を連続的に変更することが可能であることを説明する。

20       ここで、X線露光装置の系として、本発明の実施の形態8において検討したX線露光装置の系と同様の系を考える。ただし、本発明の実施の形態9においては、実施の形態8における系と異なり、金を用いたX線ミラーは用いず、始めから本発明によるダイヤモンドを用いたX線ミラーを2枚用いる。そして、この2枚のX線ミラーに対するX線の斜入射角を $0.6\sim 1.5^{\circ}$ と変化させた場合の、ベリリウム窓を透過した後のX線のスペクトルを図7に示す。ここで、図7は、X線の波長とX線の相対強度との関係を示すグラフである。

25       図7を参照して、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することにより、得られるX線のピーク波長を連続的に変化させることができる。

（実施の形態10）

本発明の実施の形態8および9におけるX線ミラーの制御方法において、X線の光軸の方向を変えることなく、X線ミラーに対するX線の斜入射角を変更する

ことが可能なシステムについて説明する。

図 8 は、本発明による X 線ミラーを 2 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。図 8 を参照して、X 線 1 0 は、1 段目 X 線ミラー 1 1 に対して斜入射角  $\alpha$  で入射している。そして、1 段目 X 線ミラー 1 1 において反射された X 線 1 0 は、2 段目 X 線ミラー 1 2 にやはり斜入射角  $\alpha$  で入射し、反射される。

このときの 1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との x 軸方向の距離を  $L\alpha$ 、y 軸方向の距離を  $D$  とする。なお、1 段目 X 線ミラー 1 1 は、設置位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備える。また、2 段目 X 線ミラー 1 2 は、x 軸方向に移動可能であり、かつ、1 段目 X 線ミラー 1 1 と同様に、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を有する。図 8 に示すように、1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 とにおける X 線 1 0 の斜入射角を同一にすることにより、2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の光軸（出射光軸）は、1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸（入射光軸）とほぼ平行となる。つまり、最後に X 線が到達する X 線ミラーとしての 2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の出射方向が、最初に X 線が到達する X 線ミラーとしての 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の入射方向とほぼ同一となっている。

ここで、2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の出射方向が 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の入射方向とほぼ同一であるとは、上記出射方向と上記入射方向とのなす角度（X 線 1 0 の出射光軸と入射光軸とのなす角度）が所定の許容誤差範囲内にあることをいう。具体的には、1 枚の X 線ミラーあたり X 線の光軸における入射方向または出射方向の許容誤差が  $0.1^\circ$  程度であり、図 8 に示した系は 1 段目および 2 段目 X 線ミラー 1 1、1 2 という 2 つの X 線ミラーを備えるので、図 8 に示した系の許容誤差は  $0.2^\circ$  である。このため、上記出射方向と上記入射方向とのなす角度が  $0.2^\circ$  以下であれば、実質上 2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の出射方向が 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の入射方向とほぼ同一であると考えることができる。

次に、1 段目 X 線ミラー 1 1 に対する X 線 1 0 の斜入射角を  $\beta$  と  $\alpha$  より大きくした場合には、1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との x 軸方向の距



離を  $L\beta$  とし、2 段目 X 線ミラー 1 2 における X 線の斜入射角を  $\beta$  とすることにより、やはり 2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の光軸を 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とほぼ平行とすることができる。

このとき

5

$$D = L\alpha \times \tan(2\alpha) = L\beta \times \tan(2\beta)$$

という関係が成り立つ。

10 このため、X 線 1 0 の光軸の方向を変更すること無く、本発明の実施の形態 9 と同様に X 線のピーク波長を連続的に変化させることが可能となる。

(実施の形態 1 1)

15 図 9 は、本発明による X 線ミラーを 3 枚用いた系の制御方法を示す模式図である。1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との x 軸方向の距離は  $L$  という一定値である。また、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 との x 軸方向の距離も同様に  $L$  という一定値である。1 段目 X 線ミラー 1 1 は、位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を有する。2 段目 X 線ミラー 1 2 は、y 軸方向に平行移動する機能を有している。3 段目 X 線ミラー 1 3 は、1 段目 X 線ミラー 1 1 と同様に紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備えている。

20 X 線 1 0 が 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する際の斜入射角が  $\alpha$  の場合、1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との間の y 軸方向の距離を  $D\alpha$  とする。そして、3 段目 X 線ミラー 1 3 への X 線 1 0 の斜入射角が  $\alpha$  となるように、3 段目 X 線ミラー 1 3 の角度を制御する。この結果、最後に X 線 1 0 が到達する X 線ミラーとしての 3 段目 X 線ミラー 1 3 から出射する X 線 1 0 の光軸（出射光軸）  
25 と、最初に X 線 1 0 が到達する X 線ミラーとしての 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸（入射光軸）とをほぼ同一とすることができる。ただし、2 段目 X 線ミラー 1 2 に対する X 線 1 0 の斜入射角は  $2\alpha$  となる。ここで、上記入射光軸と出射光軸とがほぼ同一とは、入射光軸と出射光軸とが実質的に重なるとともに、入射光軸と出射光軸とのなす角度が所定の許容誤差範囲内にあることを

いう。本発明の実施の形態 10 において説明したように、1 枚の X 線ミラーあたりの X 線の光軸における光軸入射方向または出射方向の許容誤差が 0.1° 程度である。そのため、図 9 に示した系は 1 ～ 3 段目 X 線ミラー 11 ～ 13 という 3 つの X 線ミラーを備えるので、図 9 に示した系の許容誤差は 0.3° である。

5 次、1 段目 X 線ミラー 11 に対する X 線 10 の斜入射角が  $\beta$  となるように 1 段目 X 線ミラー 11 を回転させた場合を考える。この場合、2 段目 X 線ミラー 12 を y 軸方向に平行移動させる。また、3 段目 X 線ミラー 13 において、X 線 10 の斜入射角が  $\beta$  となるように 3 段目 X 線ミラー 13 を回転させることにより、先ほどと同様に 3 段目 X 線ミラー 13 から出射する X 線 10 の光軸と 1 段目 X 線ミラー 11 に入射する X 線 10 の光軸とをほぼ同一とすることができる。

10 このように、X 線 10 の光軸を同一としたまま、X 線ミラー 11、12、13 に対する X 線の斜入射角を任意に選択することが可能となる。このとき、

$$L = \frac{D\alpha}{\tan(2\alpha)} = \frac{D\beta}{\tan(2\beta)}$$

15

という関係が成り立つ。

ここで、1 段目 X 線ミラー 11 および 3 段目 X 線ミラー 13 としてベリリウムを、2 段目 X 線ミラー 12 として窒化チタンをそれぞれ用いた X 線ミラーを使用する場合に得られる X 線のスペクトルを図 10 に示す。なお、X 線露光装置の系としては、本発明の実施の形態 8 および 9 と同様に、光源として臨界波長 0.7 nm のシンクロトロン放射源、X 線取出窓として厚さ 20  $\mu$ m のベリリウム窓を用いた系を考える。

20

図 10 は、本発明の実施の形態 11 における X 線露光装置の系において得られる X 線の波長と X 線の相対強度との関係を示すグラフである。

25 図 10 を参照して、1 段目 X 線ミラー 11 (図 9 参照) および 3 段目 X 線ミラー 13 (図 9 参照) における斜入射角を 0.5 ～ 0.75° という範囲で 0.05° ピッチで変化させる。そして、この変化に対応するように、2 段目 X 線ミラー 12 (図 9 参照) については、1.0 ～ 1.5° という範囲を 0.1° ピッチ

で変化させている。図 10 からわかるように、X 線のピーク波長を連続的に変化させることが可能であることがわかる。

(実施の形態 12)

図 11 は、本発明による X 線ミラーを 4 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。図 11 を参照して、4 枚の X 線ミラーを用いて X 線 10 の光軸を変えることなく、X 線ミラーに対する X 線の斜入射角を変更することが可能なシステムについて説明する。

図 11 を参照して、1 段目 X 線ミラー 11 と、x 軸方向に一定の距離 L だけ離れた位置に 2 段目 X 線ミラー 12 が設置されている。3 段目 X 線ミラー 13 は、2 段目 X 線ミラー 12 から x 軸方向に L' だけ離れた位置に設置されている。4 段目 X 線ミラー 14 は、3 段目 X 線ミラー 13 から x 軸方向に一定の距離 L だけ離れた位置に設置されている。1 段目 X 線ミラー 11 と 4 段目 X 線ミラー 14 とは、位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備える。2 段目 X 線ミラー 12 と 3 段目 X 線ミラー 13 とは、紙面に垂直な軸を中心とする回転機能の他、y 軸方向に移動する機能を備える。

1 段目 X 線ミラー 11 における X 線 10 の斜入射角が  $\alpha$  の場合、2 段目 X 線ミラー 12、3 段目 X 線ミラー 13、4 段目 X 線ミラー 14 のいずれにおいても X 線の斜入射角が  $\alpha$  となるように X 線ミラー 12、13、14 の回転角度および位置を調節する。このときの 1 段目 X 線ミラー 11 と 2 段目 X 線ミラー 12 との y 軸方向における距離を  $D_\alpha$  とする。この結果、最初に X 線 10 が到達する X 線ミラーとしての 1 段目 X 線ミラー 11 に入射する X 線 10 の光軸（入射光軸）と、最後に X 線 10 が到達する X 線ミラーとしての 4 段目 X 線ミラー 14 から出射する X 線 10 の光軸（出射光軸）とはほぼ同一となる。具体的には、1 段目 X 線ミラー 11 に入射する X 線 10 の光軸（入射光軸）と、4 段目 X 線ミラー 14 から出射する X 線 10 の光軸（出射光軸）とが実質的に重なっていると同時に、入射光軸と出射光軸とのなす角度が所定の許容誤差範囲内（図 11 に示した系では 4 枚の X 線ミラー 11 ~ 14 を備えるため、 $0.4^\circ$  以下）となっている。

次に、1 段目 X 線ミラー 11 における X 線 10 の斜入射角が  $\beta$  となるように 1 段目 X 線ミラー 11 を回転させる。このとき、2 段目 X 線ミラー 12 と 3 段目 X

線ミラー13とをy軸方向に平行移動させる。また、同時に、2段目X線ミラー12と3段目X線ミラー13とにおけるX線の斜入射角が $\beta$ となるように、それぞれのX線ミラー12、13を回転する。そして、4段目X線ミラー14においても、X線の斜入射角が $\beta$ となるように4段目X線ミラーを回転させることにより、先ほどと同様に4段目X線ミラー14から出射するX線10の光軸と1段目X線ミラー11に入射するX線10の光軸とをほぼ同一とすることができる。すなわち、X線10の光軸を保ったまま、X線ミラー11～14に対するX線の斜入射角を任意に選択することが可能となる。このとき、

$$L = \frac{D\alpha}{\tan(2\alpha)} = \frac{D\beta}{\tan(2\beta)}$$

という関係が成り立つ。

このため、X線10の光軸を変更すること無く、本発明の実施の形態11と同様にX線のピーク波長を連続的に変化させることが可能となる。

(実施の形態13)

図12は、本発明によるX線ミラーを4枚用いたもう1つの系での制御方法を示す模式図である。

図12を参照して、1段目X線ミラー11から、x軸方向に $L\alpha$ だけ間隔を隔てて2段目X線ミラー12が設置されている。2段目X線ミラー12からx軸方向に $L\beta$ だけ間隔を隔てて3段目X線ミラー13が設置されている。3段目X線ミラー13からx軸方向に $L\alpha$ だけ間隔を隔てて4段目X線ミラー14が設置されている。なお、それぞれのX線ミラーの間の距離は、それぞれのX線ミラーでの反射中心の間の距離を示す。

ここで、1段目X線ミラー11は、その位置および回転角度も固定されている。2段目X線ミラー12と3段目X線ミラー13とはそれぞれ紙面に対して垂直な軸を中心とした回転機能と、x軸方向における移動機能を備える。4段目X線ミラー14は回転角が一定であり、x軸方向における移動機能を備えている。

ここで、1段目X線ミラー11と4段目X線ミラー14とにおけるX線の斜入

射角を一定値の $\alpha$ とする。なお、この斜入射角 $\alpha$ は、X線ミラー11、14でのX線の吸収を抑制するため極力小さい値とする。次に、2段目X線ミラー12と3段目X線ミラー13とにおけるX線の斜入射角を $\beta$  ( $\beta > \alpha$ )とする。また、2段目X線ミラー12と3段目X線ミラー13とのy軸方向における距離を一定値Dとする。このようにすると、

$$D = 2 \times L\alpha \times \tan(2\alpha) = L\beta \times \tan 2(\beta - \alpha)$$

という関係が成り立つ。そして、上記の関係が維持されるように、斜入射角 $\beta$ 、X線ミラー間の距離 $L\alpha$ 、 $L\beta$ をそれぞれ調節する。

ここで、斜入射角 $\alpha$ を非常に小さい角度とすることで、1段目X線ミラー11および4段目X線ミラー14におけるX線10の減衰がほとんどない状態とすることができる。また、最後にX線10が到達するX線ミラーとしての4段目X線ミラー14から出射するX線10の光軸（出射光軸）と、最初にX線10が到達するX線ミラーとしての1段目X線ミラー11に入射するX線10の光軸（入射光軸）とをほぼ同一とした状態で、2段目X線ミラー12および3段目X線ミラー13におけるX線10の斜入射角 $\beta$ を任意に調節することができる。このため、本発明の実施の形態13における制御方法では、本発明の実施の形態12と同様に効果を得ることができると同時に、本発明の実施の形態12よりもX線の減衰量を小さくすることができる。なお、上記のように出射光軸と入射光軸とがほぼ同一であるとは、図12に示すように、1段目X線ミラー11に入射するX線10の光軸（入射光軸）と、4段目X線ミラー14から出射するX線10の光軸（出射光軸）とが実質的に重なっていると同時に、入射光軸と出射光軸とのなす角度が所定の許容誤差範囲内（図12に示した系では4枚のX線ミラー11～14を備えるため、0.4°以下）となっていることをいう。

このように、本発明によれば、X線10の光軸を変化させることなく、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。ここで、図12に示した系において、1段目から4段目までのすべてのX線ミラー11～14にベリリウムを用いたX線ミラーを適用した場合に得られるX線のスペクトルを、図13に示す。図

1 3は、本発明の実施の形態 1 3におけるX線の波長とX線の相対強度との関係を示すグラフである。

5 なお、図 1 3は、1 段目X線ミラー 1 1および4 段目X線ミラー 1 4における斜入射角 $\alpha$ は0. 5°とし、2 段目X線ミラー 1 2と3 段目X線ミラー 1 3とにおけるX線の斜入射角を0. 5～1. 0°という範囲で変化させた場合のX線のスペクトルを示している。また、その他のX線露光装置の構成は、本発明の実施の形態 8もしくは実施の形態 9において用いた系と同様である。

図 1 3を参照して、X線のピーク波長を連続的に変更することが可能であることがわかる。

10 このように、X線のピーク波長を任意に変更できるので、用いるX線マスクや要求される解像度、また使用するレジストの性質などにより適した波長のX線を使用することができる。

(実施の形態 1 4)

15 図 1 4は、本発明によるX線マスクを示す断面模式図である。図 1 4を参照して、X線マスクを説明する。

20 図 1 4を参照して、X線マスクは基板 1 5とダイヤモンドメンブレン 1 6と重元素であるモリブデンの薄膜 1 7 a～1 7 cおよび軽元素であるカーボンの薄膜 1 8 a、1 8 bからなるX線吸収体とガードリング 1 9とを備える。基板 1 5上にダイヤモンドメンブレン 1 6が形成されている。ダイヤモンドメンブレン 1 6上にX線吸収体としてモリブデン薄膜 1 7 a～1 7 cとカーボン薄膜 1 8 a、1 8 bとがそれぞれ互いに積層するように形成されている。このX線吸収体には、転写パターン 2 0が形成されている。転写パターン 2 0の下に位置する領域には、基板 1 5に窓部 2 1が形成されている。窓部 2 1においてはダイヤモンドメンブレン 1 6の裏面が露出している。基板 1 5下にはガードリング 1 9が設置されている。ここで、X線吸収体に形成された転写用パターン 2 0は、電子線描画を用いて形成されたレジストパターンをマスクとしてX線吸収体をエッチングすることにより形成されている。

25 ここで、X線吸収体の積層数およびそれぞれの層の厚さは、要求される遮光量、すなわち必要なマスクコントラストに応じて決定される。たとえば、低コン

トラストマスクとする場合には、図 1 4 に示したように積層数を 5 層と比較的少なくする。一方、高コントラストとする場合には、積層数を 2 0 層と多くする。なお、積層数は 2 以上ならばその他の積層数でも同様の効果を得ることができる。

- 5       ここで、X 線を用いた露光工程において X 線吸収体が遮光しなければならない X 線の波長領域は、0. 5 ~ 1 5. nm と広い領域に及ぶ。このため、従来のように単一の材料で X 線吸収体を形成する場合に、遮光が必要な波長領域のすべてを十分に遮光するためには、X 線吸収体の膜厚を厚くする必要があった。この結果、転写用パターン 2 0 におけるアスペクト比が大きくなり、微細なパターンを
- 10       形成する場合には不利であった。

      なお、従来から X 線マスクにおける X 線の吸収体として提案されている重金属やその化合物、合金などは、本発明において利用しようとする短波長領域の X 線に対しても高い吸収能を有している。そのため、X 線吸収体を構成する材料としてこれらのタングステンなどの材料を用いることは原理的には可能である。

- 15       また、発明者らは、波長が 0. 5 ~ 1. 5 nm という X 線を遮光するため、多層膜の積層厚さを異ならせた複数の X 線吸収体を備える X 線マスクを試作した。この結果、積層厚さを調節することにより、波長ごとの遮光量、すなわちコントラストを変えることが可能であった。つまり、積層厚さを調節することにより X 線の各波長ごとのコントラストを変えることができる。そして、この結果、高い
- 20       解像度を有する回路パターンを転写する場合により適したコントラストを有する X 線マスクの設計が可能となった。

      なお、図 1 4 に示した X 線マスクでは、重元素としてモリブデンを、軽元素としてカーボンを用いたが、重元素としてモリブデンを、軽元素としてベリリウムを用いた X 線マスクを用いても同様の効果を得ることができる。

- 25       また、メンブレンとしてダイヤモンド薄膜を用いているので、従来の炭化珪素などをメンブレンとして用いた場合のように、波長が 0. 6 nm 近辺の X 線をメンブレンが吸収するというようなことを防止できる。

      このような本発明による X 線マスクを、実施の形態 1 などに示した本発明による X 線露光装置における X 線マスクとして用いれば、従来よりも短波長領域の X

線を利用して、露光工程を行うことができる。

5        このように、X線遮光体として作用する多層膜からなるX線吸収体を用いるので、X線吸収体の膜厚が厚くなることに起因して転写回路パターンのアスペクト比が増大するという問題を解決することが可能となった。この結果、ピーク波長が0.5 nm付近の短波長X線を用いて露光工程を行なうことが可能となった。つまり、X線を用いた近接露光工程の解像限界の決定要因であるフレネル回折による解像限界を従来よりも微細なサイズ領域にまで拡大することが可能となった。この結果、従来よりもより高い解像度の回路パターンを転写することができる。

10        (実施の形態15)

15        発明者らは、メンブレンとしてベリリウムを用い、重元素をロジウム、軽元素をベリリウムとしたX線マスクを作製した。このX線マスクの構造は、基本的には図14に示したX線マスクと同様である。また、ここでベリリウムからなるメンブレンは、イオンビームスパッタ法を用いて形成した。また、本発明の実施の形態14と同様にX線吸収体に転写パターンを形成した後、基板として用いたシリコンウェハを裏面よりエッチングにより除去することにより、窓21(図14参照)を形成した。

20        このように、重元素としてロジウムを、軽元素としてベリリウムを用いたX線マスクによっても、本発明の実施の形態14に示したX線マスクと同様の効果を得ることができる。

      なお、ここで、タンタル系材料やタングステン系材料などをX線吸収体として用いたX線マスクも、本発明によるX線露光装置において使用することができる。

      (実施の形態16)

25        図15は、X線吸収体として用いられる材料についてのX線の波長とX線の透過率との関係を示すグラフである。なお、図中の凡例において、たとえば、Re(21.02)0.5 μmとあるのは、試料としてReを用い、この試料の密度が21.02 g/cm<sup>3</sup>であり、試料の膜厚が0.5 μmであることを示す。

      ここで、本発明の実施の形態8、9、11、13などのように、X線のピーク



波長を短波長化した場合には、従来からX線吸収体として用いられているタングステンやタンタル系の材料におけるX線の透過率は低下する。

図15を参照して、X線のピーク波長を0.4～0.6 nmに設定すれば、従来のようにピーク波長が0.8 nm付近である場合と比較して、X線の透過率は0.1～0.5倍となる。すなわち、従来と同様のマスクコントラストを得るために必要なX線吸収体の厚さを0.1～0.5倍にすることが可能となる。つまり、図15に示した材料をX線吸収体としてのX線吸収体に用いれば、X線吸収体の膜厚を薄くすることが可能であることがわかる。この結果、X線マスクにおける転写回路パターンのアスペクト比をより小さくすることができるので、X線マスクにおける転写回路パターンの微細化をより進めることが可能となる。

なお、本発明の実施の形態2～16に示したX線ミラーおよびX線マスクを本発明の実施の形態1に示したX線露光装置に適用することができる。

#### (実施の形態17)

図16は、本発明によるシンクロトロン放射装置を適用したX線露光システムの概略図である。図16を参照して、シンクロトロン放射装置およびX線露光システムを説明する。

図16を参照して、シンクロトロン放射装置は、シンクロトロン放射源1と、平面ミラーであるX線ミラー3a～3cと、集光ミラー22と、拡大ミラー23と、を備える。そして、X線露光システムは、上記のシンクロトロン放射装置とX線マスク6とを備える。X線ミラー3a～3cはベリリウムからなる。集光ミラー22および拡大ミラー23は、それぞれロジウムからなる。ここで、シンクロトロン放射装置はX線放射装置として用いられている。

シンクロトロン放射源1から出射した放射光2aは、図16に示すように、X線ミラー3a～3c、集光ミラー22および拡大ミラー23の順番に入射し、最終的にはX線マスク6を介してレジストが塗布されている半導体ウェハ9に照射される。

X線ミラー3a～3cの配置は、図9に示した本発明によるX線ミラーの実施の形態11と同様である。そして、数2で示した数式を満足するようにその配置は決定されている。このため、本発明の実施の形態11と同様に、X線ミラー3

c から出射する反射光である放射光の光軸は、シンクロトロン放射源 1 から出射した放射光 2 a の光軸とほぼ重なることになる。また、本発明の実施の形態 1 1 と同様に、X 線ミラー 3 a ~ 3 c の位置や X 線ミラー 3 a ~ 3 c への放射光の斜入射角  $\alpha$  (図 9 参照) を変更する場合にも、数 2 で示した数式を満足するように斜入射角  $\alpha$  などを決定すれば、X 線ミラー 3 c から出射する放射光の光軸を、シンクロトロン放射源 1 から出射した放射光 2 a の光軸とほぼ重なる位置に保つことができる。この結果、X 線ミラー 3 a ~ 3 c における放射光の斜入射角  $\alpha$  を変更した場合にも、集光ミラー 2 2 に入射する放射光の光軸の位置を一定に保つことができる。

10       ここで、X 線ミラー 3 a ~ 3 c を構成するベリリウムは、吸収端波長が 1 1. 1 nm である。そして、ベリリウムはこの 1 1. 1 nm より短波長側の波長領域において吸収端を有さない。このため、ベリリウムからなる X 線ミラー 3 a ~ 3 c への放射光の斜入射角を変更することにより、図 1 3 に示したように、0. 4 5 ~ 0. 7 nm という波長領域において、任意のピーク波長を有する X 線を得ることができると同時に、任意の波長より短波長領域の X 線を吸収カットすることが可能である。

20       次に、X 線ミラー 3 c から出射した放射光は、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 に入射する。ここで、シンクロトロン放射源 1 から出射する放射光 2 a は、水平方向における出射角は比較的大きいが、垂直方向における出射角は比較的小さい。このため、X 線ミラー 3 a ~ 3 c から出射する放射光をそのまま X 線マスク 6 に照射して露光工程を実施する場合には、垂直方向において十分な照射領域を確保することが難しい。このような問題を解決するため、拡大ミラー 2 3 では、放射光を反射する面が凸面状となっている。この結果、拡大ミラー 2 3 から出射する放射光 2 b の垂直方向における照射領域を拡大することができる。なお、ここでは拡大ミラー 2 3 として放射光を反射する面が凸面状になっているものを用いているが、このような拡大ミラーに代えて、ミラーを回転振動、あるいは平行振動させることによりミラーから出射する放射光 2 b の垂直方向における照射領域を拡大する、いわゆるミラースキャン方式の拡大ミラーを用いてもよい。

また、放射光 2 a の水平方向における出射角が比較的大きいことから、X線ミラー 3 a ~ 3 c から出射する放射光をそのまま露光工程に用いたのでは、十分な照射強度を得ることも難しかった。このような問題を解決するため、集光ミラー 2 2 では放射光を反射する面が凹面状となっている。この結果、集光ミラー 2 2 が存在しない場合にはX線マスク 6 に入射しないような大きな出射角における放射光について、X線マスク 6 に入射するようにその放射光の進行方向を変更することができる。このため、X線マスク 6 に入射する放射光の照射強度を高めることができる。

次に、拡大ミラー 2 3 から出射した放射光 2 b はX線マスク 6 に照射される。X線マスク 6 は、図 1 7 に示すように、ガードリング 1 9 とダイヤモンドメンブレン 1 6 とX線吸収体 2 4 からなる転写用パターン 2 0 とを備える。転写用パターン 2 0 は、ダイヤモンドメンブレン 1 6 の裏面が露出している窓部 2 1 上に位置する領域に形成されている。ここで、図 1 7 は、図 1 6 におけるX線マスクと半導体ウェハとを示す部分拡大断面図である。図 1 7 を参照して、ダイヤモンドメンブレン 1 6 の膜厚は  $1\ \mu\text{m}$  とした。また、X線吸収体 2 4 の材料としては、本発明の実施の形態 1 4 におけるX線マスクのX線吸収体と同様の材料を用いることができる。そして、X線マスク 6 を透過した放射光 2 b は、表面にレジストが塗布された半導体ウェハ 9 に照射され、レジストを感光する。このようにして、レジストにX線マスク 6 の転写用パターン 2 0 が転写される。

ここで、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 を構成するロジウムは、図 3 に示したように、斜入射角が  $1.0^\circ$  以下という条件で、波長がほぼ  $0.45\text{ nm}$  以上の放射光を反射することができる。このため、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 への放射光の斜入射角を  $1.0^\circ$  以下とすることにより、 $0.45\text{ nm}$  以上の波長領域の放射光を確実に得ることができる。

また、本発明によるシンクロトロン放射装置およびX線露光システムでは、X線ミラー 3 a ~ 3 c、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 は超高真空環境下に設置されている。一方、X線マスク 6 および半導体ウェハ 9 は大気圧環境下、若しくは減圧されたヘリウム雰囲気中あるいは空気中に設置される。このため、拡大ミラー 2 3 とX線マスク 6 との間には真空隔壁となるX線透過窓（図示せず）

が設置される。このX線透過窓の材料としてはベリリウムが用いてもよい。このベリリウムは0.45～0.7 nmの波長領域において吸収端を有さない。このため、ベリリウム膜を用いたX線透過窓は上記のような波長領域のX線を効率よく透過させることができる。このように、X線透過窓の材質としても、ベリリウムのような0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料、つまり0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さない材料を用いることが好ましい。ただし、X線透過窓におけるX線が透過する部分の膜厚を十分薄くできる場合には、上記以外の材料を用いてもよい。

また、本発明によるシンクロトロン放射装置およびX線露光システムでは、X線マスク6のメンブレンとしてダイヤモンドメンブレン16を用いている。このダイヤモンドメンブレンを構成する炭素の吸収端波長は4.368 nmであり、この4.368 nmより短波長領域において炭素は吸収端を有さない。一方、従来メンブレンとして用いられていた炭化珪素は、0.45 nmから0.7 nmの波長領域に吸収端を有しているため、図5に示すように、上記波長領域においてX線の透過率が低下する。このことから、従来の炭化珪素を用いたメンブレンと比べて、ダイヤモンドメンブレン16では、放射光に含まれる0.45 nmから0.7 nmの波長領域のX線の透過率をより大きくできることがわかる。このように、図17に示したようなX線マスクを用いることにより、0.45 nm～0.7 nmまでの波長領域における放射光（X線）2bを有効に利用できる。

このように、本発明によるシンクロトロン放射装置およびX線露光システムでは、0.45 nm～0.7 nmという波長領域の放射光（X線）を得ることができ、かつ、X線ミラー3a～3cでのX線の斜入射角を調節することにより、0.45 nm～0.7 nmの波長領域における任意の波長より短波長側の放射光成分をカットできる。上記のような短波長側の放射光成分は、半導体ウェハに塗布されたレジスト中で光電子を発生させるため、レジストに転写される転写パターンの解像度を低下させる原因となる。しかし、本発明によれば、このような短波長側の放射光成分を確実に吸収カットできるので、レジストに転写される転写パターンについて高い解像度を確実に得ることができる。

また、図 1 6 に示したシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて、X 線ミラー 3 a ~ 3 c に代えて 2 枚のベリリウムからなる X 線ミラーを用いてもよい。この 2 枚の X 線ミラーは、図 8 に示した本発明の実施の形態 8 における X 線ミラーと同様の構成であってもよい。この場合、本発明の実施の形態 8 と同様の効果を得ることができる。そして、この 2 枚のベリリウムからなる X 線ミラーにおける放射光の斜入射角  $\alpha$  (図 8 参照) を  $0.5^\circ$  (入射角を  $89.5^\circ$ ) に固定し、ロジウムからなる集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 (図 1 6 参照) における放射光の斜入射角を  $1.0^\circ$  から  $2.4^\circ$  にまで変化させた場合の、拡大ミラー 2 3 から出射される放射光のスペクトルは図 1 8 に示される。ここで、図 1 8 は、ベリリウムからなるミラーとロジウムからなるミラーとを備える X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

ここで、ロジウムは、 $0.3629\text{ nm}$ 、 $0.39425\text{ nm}$ 、 $0.41299\text{ nm}$  に吸収端を有し、ロジウムは  $0.45\text{ nm}$  から  $0.7\text{ nm}$  という波長領域に吸収端を有さない。このため、ロジウムからなるミラーを用いれば、 $0.45\text{ nm}$  から  $0.7\text{ nm}$  という波長領域において X 線が急激に吸収されることに起因して X 線のスペクトルが乱れることはない。この結果、図 1 8 に示すように、ロジウムからなるミラーの斜入射角を変更しても、安定した滑らかな曲線状のスペクトルを示す X 線を得ることができる。

ここで、比較例として、上記のようなシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて上記ロジウムからなるミラーに代えて白金からなるミラーを用いた場合に得られる X 線のスペクトルを図 1 9 に示す。図 1 9 は、ベリリウムからなるミラーと白金からなるミラーとを備えるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。図 1 9 は、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を  $0.4^\circ$  あるいは  $0.5^\circ$  (入射角を  $89.6^\circ$  あるいは  $89.5^\circ$ ) とし、白金からなるミラーの斜入射角を  $0.4^\circ$  から  $2.0^\circ$  (入射角を  $89.6^\circ$  から  $88^\circ$ ) まで変化させた場合のデータを示している。白金は、 $0.4093\text{ nm}$ 、 $0.4686\text{ nm}$ 、 $0.559\text{ nm}$ 、 $0.581\text{ nm}$  に吸収端を有するため、図 1 9 に示すように、

吸収端に対応する波長においてX線の強度が低下している。そして、白金からなるミラーの斜入射角を変化させた場合にも、0.45 nmから0.7 nmという波長領域において、このように吸収端に対応する波長でX線の強度が低下している。

- 5        このように、図18および図19を参照して、本発明によるロジウムからなるX線ミラーを用いた場合には、白金からなるX線ミラーを用いた場合より上記の波長領域におけるX線を有効に利用することができる。

- 10        また、図19を参照して、白金からなるミラーの斜入射角を $0.4^{\circ}$ （入射角を $89.6^{\circ}$ ）とし、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を $0.4^{\circ}$ （入射角を $89.6^{\circ}$ ）とした場合のX線スペクトル（以下スペクトル1とよぶ）が実線で表示されている。また、白金からなるミラーの斜入射角を $0.4^{\circ}$ （入射角を $89.6^{\circ}$ ）とし、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を $0.5^{\circ}$ （入射角を $89.5^{\circ}$ ）とした場合のX線スペクトル（以下スペクトル2とよぶ）が点線で表示されている。このスペクトル1とスペクトル2とを比較すると、ベリリウム  
15        からなるミラーの斜入射角を $0.4^{\circ}$ から $0.5^{\circ}$ に変更することにより、0.4 nm以下の波長領域のX線を確実に吸収カットできることがわかる。

- 20        また、図20は、2枚の金からなるX線ミラーから反射されたX線を、X線マスクのメンブレンを透過させた後のX線スペクトルを示している。ここで、図20は、X線マスクを透過した後のX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。図20では、メンブレンとして本発明によるダイヤモンドメンブレンを用いた場合と、従来の炭化珪素からなるメンブレンを用いた場合とを示している。

- 25        図20を参照して、メンブレンとして炭化珪素を用いた場合には、珪素が0.6738 nmという波長域に吸収端を有するため、この吸収端波長においてX線の強度が大きく低下している。一方、X線マスクのメンブレンとしてダイヤモンドメンブレンを用いた場合には、このようなX線の強度低下は発生していない。なお、ここでは金からなるミラーを用いているため、金の吸収端波長である0.3616 nm、0.3936 nm、0.4518 nm、0.5374 nm、0.5584 nmにおいてX線の強度が低下している。

また、ここで図16に示したシンクロトロン放射装置およびX線露光システム

においては、本発明の実施の形態1～16に示したX線ミラーおよびX線マスクを適用することができる。

(実施の形態18)

X線マスクについて、メンブレンとX線吸収体として様々な材料を用いた場合のコントラストのデータをシミュレーションにより求めた。図21～23は、本発明によるX線マスクについてのX線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。なお、ここでコントラストとは、X線マスクにおいて、メンブレンのみを透過したX線の強度の、X線吸収体とメンブレンの両方を透過したX線の強度に対する比率とする。

図21～23を参照して、様々なメンブレンとX線吸収体との材料の組み合わせについてX線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を調査した。ここで、図21における凡例の表示は、X線ミラーの材質／ベリリウム窓の膜厚／X線マスクのメンブレンの材質／X線吸収体の材質（X線吸収体の密度）を示している。具体的には、例えばSiC／Be20／SiC／W（16.2）とあるのは、X線ミラーの材質がSiC／ベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚が20 $\mu$ m／X線マスクのメンブレンの材質がSiC／X線吸収体の材質がタングステン（W）であり、このX線吸収体の密度は16.2 g／cm<sup>3</sup>である、という意味である。

図21を参照して、X線ミラーとしてSiCを用いたデータは、従来のX線露光条件に対応しており、0.7 nm超えの波長領域にピーク波長を有するX線をX線マスクに入射した場合である。また、X線ミラーとしてロジウム（Rh）を用いたデータは、本発明によるX線露光条件に対応しており、0.45 nm以上0.7 nm以上の波長領域のにピーク波長を有するX線をX線マスクに入射した場合である。

まず、メンブレンとしてSiCを用い、そのメンブレン上に金属ウラン（U）からなるX線吸収体を形成したX線マスクに対して、SiCからなるX線ミラーにより反射したシンクロトン放射光を照射した場合（従来の露光条件）のデータが黒丸の凡例により示されている。このSiCからなるX線ミラーにおける入射角は89°とした。そして、メンブレンの膜厚は2 $\mu$ mとした。ここで、デザインルールが0.05 $\mu$ m程度という高解像度のパターンを転写するために適し

たコントラストは3以上である。そして、図21を参照してこのコントラスト3を実現するために必要なウランからなるX線吸収体の膜厚は約 $0.18\mu\text{m}$ であった。この場合、X線吸収体において形成される転写用回路パターンのアスペクト比は約3.6と、導波管効果の影響が顕著になるアスペクト比より十分小さい。つまり、上記のX線マスクは、従来の露光条件では適切なコントラストとアスペクト比とを両立できることがわかる。また、この従来の露光条件において、SiCに代えてダイヤモンド(Dia.)をメンブレンとして用いた場合も、ほぼ同様の結果となることがわかる。

次に、上記のダイヤモンドメンブレンとウランからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを、本発明による露光条件に適用した。その結果が、白四角の凡例で示されている。ここで、ロジウムからなるX線ミラーにおけるX線の入射角は $89^\circ$ とした。この場合、図21に示すように、必要なコントラスト3を得るためには、ウランからなるX線吸収体の膜厚が約 $0.37\mu\text{m}$ 必要であった。この場合、デザインルールが $0.05\mu\text{m}$ であるときのアスペクト比は7.4と大きくなる。また、デザインルールが $0.035\mu\text{m}$ となった場合には、アスペクト比が10を超えてしまう。このようにアスペクト比が大きくなると、導波管効果により微細な回路パターンの転写が困難になる。

次に、本発明による露光条件にダイヤモンドメンブレンとタングステンからなるX線吸収体とを備える本発明によるX線マスクを適用した場合が黒四角で示されている。ここで、ダイヤモンドを構成する炭素は $4.368\text{nm}$ という波長に吸収端を有する。このため、ダイヤモンドメンブレンが本発明による露光条件において露光光として用いられる $0.45\text{nm}$ 以上 $0.7\text{nm}$ 以下という波長領域のX線を強く吸収することはない。また、タングステンは $0.68\text{nm}$ という波長に吸収端を有している。このため、本発明による露光条件において露光光として用いられるX線について、タングステンからなるX線吸収体のX線吸収率は十分大きくなる。この結果、図21に示すように、必要なコントラスト3を得るために必要なタングステンからなるX線吸収体の膜厚は約 $0.24\mu\text{m}$ であった。つまり、ウランをX線吸収体として用いた場合よりX線吸収体膜厚を小さくすることができる。この場合、デザインルールが $0.05\mu\text{m}$ であるときのアスペク



ト比は4.8となり、導波管効果の影響を小さくすることが可能である。この結果、十分なコントラストと小さなアスペクト比とを両立できるので、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。つまり、本発明による露光条件のように、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いる場合に、上記  
5 の本発明によるX線マスクは特に有効であることがわかる。

なお、従来の露光条件に、SiCからなる膜とタングステンからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを適用した場合が黒四角+太線で示されている。この場合、図21からもわかるように、必要なコントラスト3を得るために必要なタングステンからなるX線吸収体の膜厚は約0.37  $\mu\text{m}$ となり、デザイン  
10 ルールが0.05  $\mu\text{m}$ であるときのアスペクト比は7.4と大きくなる。この結果、従来の露光条件にタングステンからなるX線吸収体を適用した場合には微細な回路パターンの転写が困難になることがわかる。

また、本発明による露光条件に窒化硼素(BN)からなる膜とタングステンからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを適用した場合のデータも同様に示されている。この場合も、十分な大きさのコントラストと小さなアスペクト  
15 比とを両立できるので、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。なお、ダイヤモンドを構成する炭素の吸収端は4.368 nmであり、窒素の吸収端は3.099 nmである。

次に、X線吸収体としてタンタル(Ta)およびタングステン(W)を用いた  
20 場合について、X線の波長スペクトルを変化させたときのコントラストとX線吸収体膜厚との関係を求めた。ここで、X線の波長スペクトルはベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚を変更することにより変化させた。その結果を図22および23に示す。ここで、図22および23における凡例の表示は、基本的には図21における凡例の表示と同様である。ただし、X線ミラーを2枚用いた場合はその材質を併記しており、さらにX線ミラーへのX線の入射角も記した。例えば、Rh, Be 89.4 / Be 13 / Dia. 2 / Ta 16.5とあるのは、ロジウム(Rh)からなるX線ミラーとベリリウム(Be)からなるX線ミラーとを用い、BeからなるX線ミラーでのX線の入射角が89.4°である / ベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚が13  $\mu\text{m}$  / X線マスクの膜の材質がダイヤ  
25

モンドで膜厚が $2\text{ }\mu\text{m}$ ／X線吸収体の材質がタンタルであり、このX線吸収体の密度は $16.5\text{ g/cm}^3$ という意味である。

図22を参照して、金(Au)をX線吸収体として用いた場合は、必要なコントラストを得るために必要なX線吸収体膜厚が本発明によるX線マスクの場合より厚くなることがわかる。また、金をX線吸収体として用いた場合には、本発明による露光条件においては、従来の露光条件よりも必要なコントラストを得るためのX線吸収体の膜厚が厚くなることもわかる。

そして、図22および23を参照して、ロジウムをX線ミラーとして用いた本発明による露光条件において、ダイヤモンドメンブレンとタンタルおよびタングステンをを用いたX線吸収体とを備える本発明によるX線マスクを用いれば、大きなコントラストと小さなアスペクト比とを両立することができる。この結果、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。

なお、ここではX線吸収体としてタングステンおよびタンタルを用いたが、本発明によるX線マスクにおいて、TaGe、TaReGe、WN、WSi、WGe、WRe、WReGeなどの合金や化合物をX線吸収体として用いても同様の効果を得ることができる。また、メンブレンとしてダイヤモンドを用いたが、窒化硼素、ダイヤモンドライクカーボン、ベリリウムなどの $0.45\text{ nm}$ 以上 $0.7\text{ nm}$ 以下の波長領域に吸収端を有さない材料をメンブレンとして用いれば、同様の効果を得ることができる。

また、実施の形態18に示したX線マスクは、実施の形態1に示したX線露光装置および実施の形態17に示したシンクロトロン放射装置およびX線露光システムに適用可能である。また、この実施の形態18におけるX線マスクのX線吸収体について、図14に示したようにこのX線吸収体を多層構造としても、同様の効果を得ることができる。

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した実施の形態ではなくて請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

#### 産業上の利用可能性

この発明は、半導体装置の製造方法および半導体装置の製造設備などにおいて利用することが可能である。

## 請求の範囲

1. X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラー  
5 (3、3a～3c、11～14)を備える、X線露光装置。
2. 前記X線はシンクロトロン放射源(1)から出射した放射光に含まれる、請求項1に記載のX線露光装置。
3. 前記X線ミラーは、0.3nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含む、請求項1に記載のX線露光装置。
- 10 4. 前記X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含む、請求項1に記載のX線露光装置。
5. 前記X線ミラーはX線を集光する機能を有する、請求項1に記載のX線露  
15 光装置。
6. 前記X線ミラーは、前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する、請求項1に記載のX線露光装置。
7. X線集光ミラー(22)をさらに備える、請求項1に記載のX線露光装置。
- 20 8. 前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラー(23)をさらに備える、請求項1に記載のX線露光装置。
9. 前記X線ミラーにおけるX線が入射する面は機械的に研磨されている、請求項1に記載のX線露光装置。
- 25 10. 前記X線ミラーにおけるX線が入射する面は化学的に研磨されている、請求項1に記載のX線露光装置。
11. X線マスク(6)をさらに備え、前記X線マスクは、メンブレン(16)と、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体(17a～17c、18a、18b、24)とを含み、

前記メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される１種を含む、請求項１に記載のＸ線露光装置。

５ １２． Ｘ線マスク（６）をさらに備え、前記Ｘ線マスクは、メンブレン（１６）と、そのメンブレン上に形成されたＸ線吸収体（１７ａ～１７ｃ、１８ａ、１８ｂ）とを含み、

前記メンブレンは、Ｘ線について０．４５ｎｍ未満の波長領域および０．７ｎｍ超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

１０ 前記Ｘ線吸収体は、０．６ｎｍ以上０．８５ｎｍ未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、請求項１に記載のＸ線露光装置。

１３． 前記Ｘ線ミラーを複数備える、請求項１に記載のＸ線露光装置。

１４． 最後にＸ線（１０）が到達する前記Ｘ線ミラーから出射するＸ線（１０）の出射方向が、最初にＸ線（１０）が到達する前記Ｘ線ミラーに入射するＸ線（１０）の入射方向とほぼ同一である、請求項１に記載のＸ線露光装置。

１５ １５． 最後にＸ線（１０）が到達する前記Ｘ線ミラーから出射するＸ線（１０）の出射光軸が、最初にＸ線（１０）が到達する前記Ｘ線ミラーに入射するＸ線（１０）の入射光軸とほぼ同一である、請求項１に記載のＸ線露光装置。

２０ １６． Ｘ線について０．４５ｎｍ未満の波長領域および０．７ｎｍ超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有するＸ線ミラー（３、３ａ～３ｃ、１１～１４）。

１７． シンクロトロン放射源（１）から出射した放射光に含まれるＸ線を反射する、請求項１６に記載のＸ線ミラー。

２５ １８． ０．３ｎｍ未満の波長領域のＸ線を９０％以上吸収して短波長をカットする、請求項１６に記載のＸ線ミラー。

１９． 前記Ｘ線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される１種のミラー材料を含む、請求項１６に記載のＸ線ミラー。

20. X線を集光する機能を有する、請求項16に記載のX線ミラー。
21. X線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する、請求項16に記載のX線ミラー。
22. X線が入射する面が機械的に研磨されている、請求項16に記載のX線ミラー。
23. X線が入射する面が化学的に研磨されている、請求項16に記載のX線ミラー。
24. X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラー  
(3、3a～3c、11～14)にX線を入射させるX線入射工程と、  
前記X線ミラーから出射するX線を用いて露光を行なう露光工程とを備える、  
X線露光方法。
25. 前記X線をシンクロトロン放射源(1)から出射させるX線出射工程をさらに備える、請求項24に記載のX線露光方法。
26. 前記X線ミラーは、0.3nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含む、請求項24に記載のX線露光方法。
27. 前記X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含む、請求項24に記載のX線露光方法。
28. 前記X線入射工程は、前記X線ミラーを用いてX線を集光する工程を含む、請求項24に記載のX線露光方法。
29. 前記X線入射工程は、前記X線ミラーを用いて、前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含む、請求項24に記載のX線露光方法。
30. 前記X線入射工程は、集光ミラー(22)を用いてX線をさらに集光する工程を含む、請求項24に記載のX線露光方法。
31. 前記X線入射工程は、前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を、拡大ミラー(23)を用いて拡大する工程を含む、請求項2

4に記載のX線露光方法。

32. 前記X線入射工程では、X線が入射する面が機械的に研磨されている前記X線ミラーを用いる、請求項24に記載のX線露光方法。

5 33. 前記X線入射工程では、X線が入射する面が化学的に研磨されている前記X線ミラーを用いる、請求項24に記載のX線露光方法。

34. X線マスク(6)を用い、前記X線マスクは、メンブレン(16)と、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体(17a~17c、18a、18b、24)とを含み、

10 前記メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含む、請求項24に記載のX線露光方法。

35. X線マスク(6)を用い、前記X線マスクは、メンブレン(16)と、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体(17a~17c、18a、18b、24)とを含み、

15 前記メンブレンは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記X線吸収体は、0.6nm以上0.85nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、請求項24に記載のX線露光方法。

20 36. 前記X線入射工程では複数の前記X線ミラーを用いる、請求項24に記載のX線露光方法。

37. 前記X線入射工程では、最後にX線(10)が到達する前記X線ミラーから出射するX線(10)の出射方向が、最初にX線(10)が到達する前記X線ミラーに入射するX線(10)の入射方向とほぼ同一である、請求項24に記載のX線露光方法。

25 38. 前記X線入射工程では、最後にX線(10)が到達する前記X線ミラーから出射するX線(10)の出射光軸が、最初にX線(10)が到達するX線ミラーに入射するX線(10)の入射光軸とほぼ同一である、請求項24に記載のX線露光方法。

39. 請求項24に記載のX線露光方法を用いて製造された半導体装置。

40. シンクロトロン放射源(1)と、複数のX線ミラーを含み前記シンクロトロン放射源から出射される放射光(2、2a、2b)が入射するX線ミラー群(3a～3c、11～14)とを備えるシンクロトロン放射装置であって、

5 前記X線ミラーは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向と、前記X線ミラー群から出射する反射光の出射方向とがほぼ同一である、シンクロトロン放射装置。

41. 前記シンクロトロン放射源(1)から出射される放射光の出射光軸と、前記X線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一である、請求項40に記載のシンクロトロン放射装置。

42. シンクロトロン放射源(1)と、複数のX線ミラー(3、3a～3c、11～14)を含み前記シンクロトロン放射源から出射される放射光が入射するX線ミラー群とを備えるシンクロトロン放射装置を用いたシンクロトロン放射方法であって、

シンクロトロン放射源(1)から出射した放射光(2a)を、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーに入射させる放射光入射工程と、

前記X線ミラー群から、前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向とほぼ同一の方向に反射光を出射する反射光出射工程とを備える、シンクロトロン放射方法。

43. 前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、前記X線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一である、請求項42に記載のシンクロトロン放射方法。

44. メンブレン(16)と、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体(17a～17c、18a、18b、24)とを備え、



前記メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

5 前記X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、X線マスク。

45. 請求項44に記載のX線マスクを含む、X線露光装置。

## 要約書

X線露光装置は、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm  
超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含  
むX線ミラー（3、3a～3c、11～14）を備える。

FIG. 1

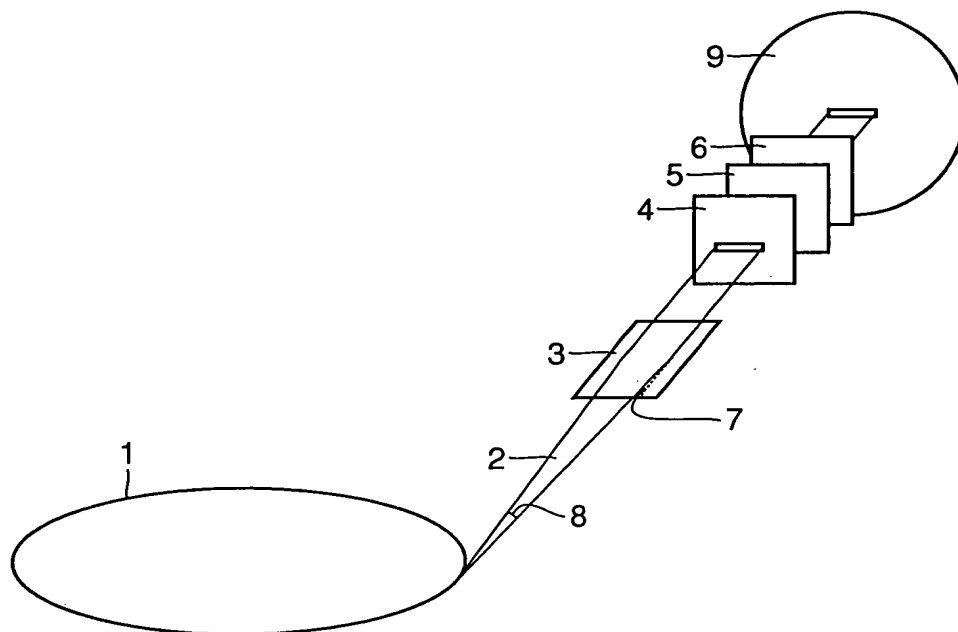


FIG. 2

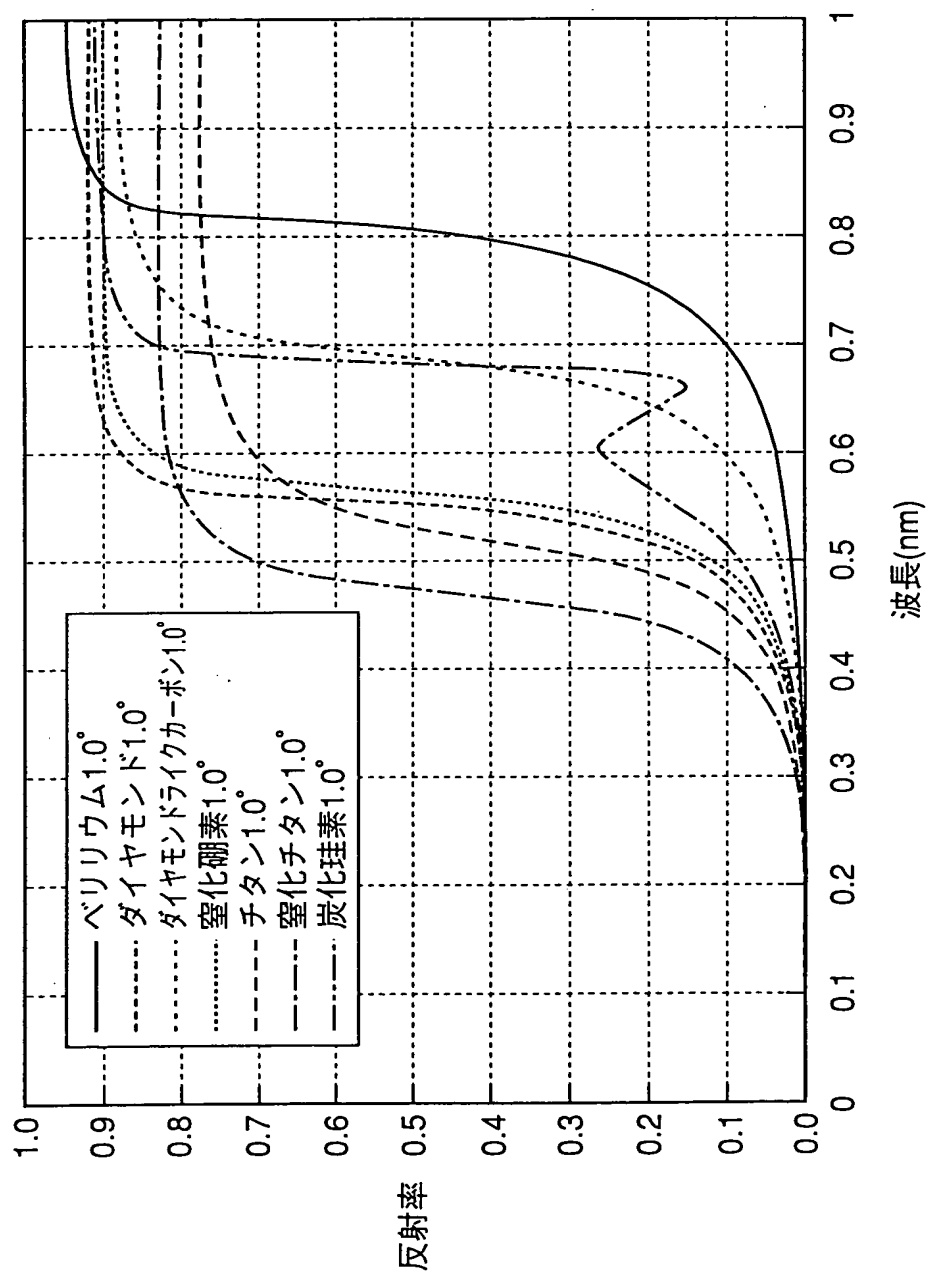


FIG. 3

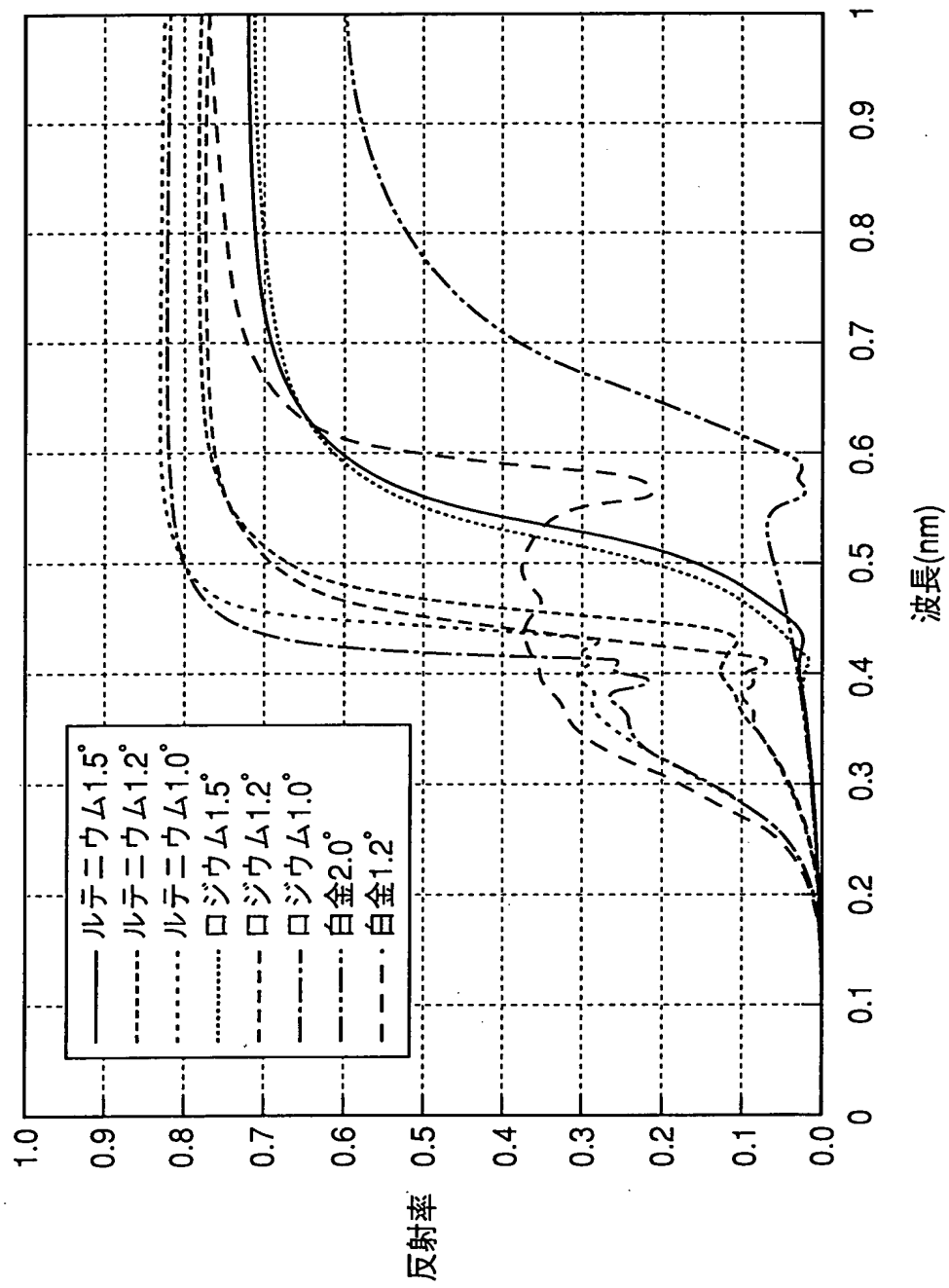


FIG. 4

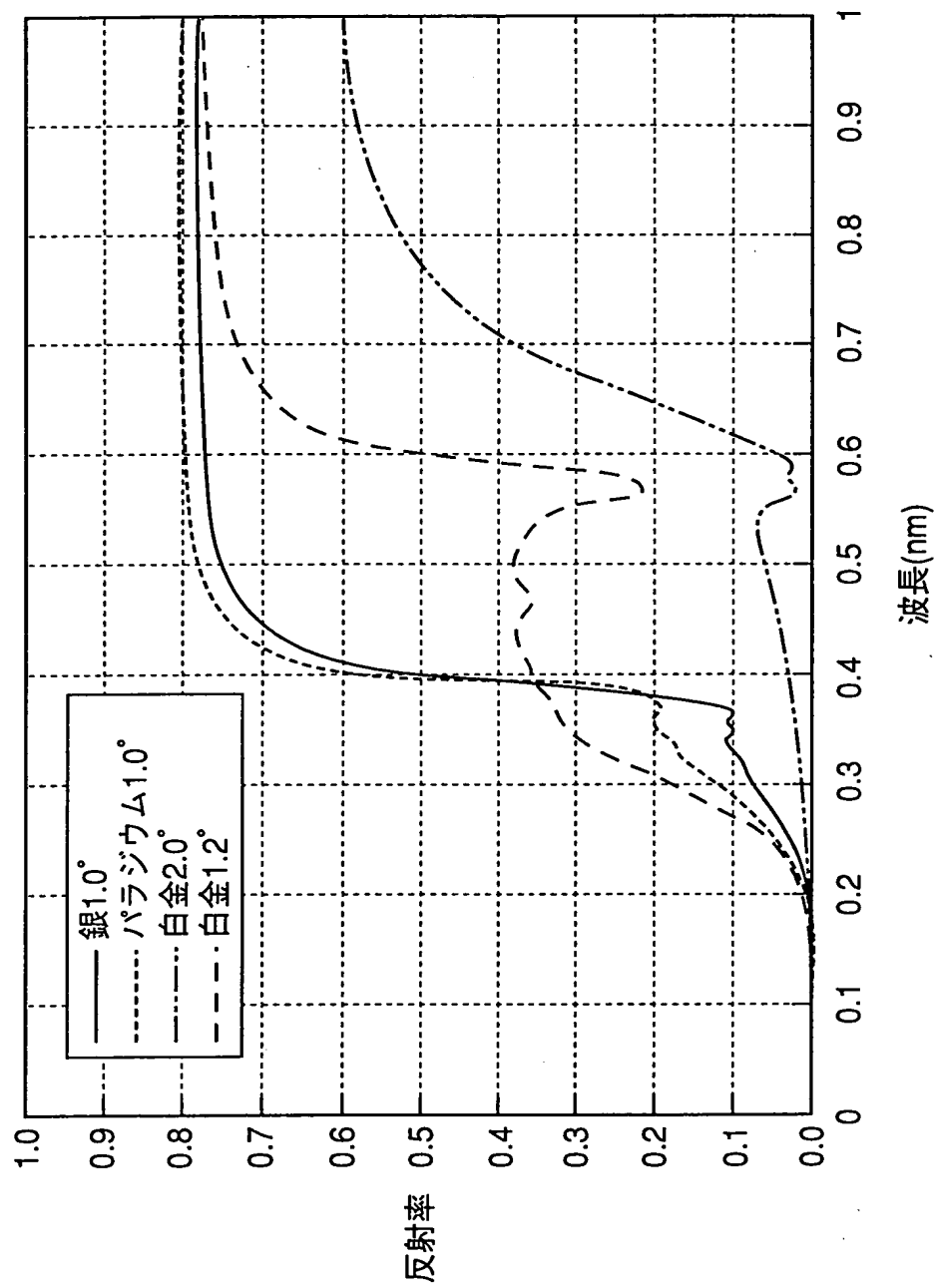


FIG. 5

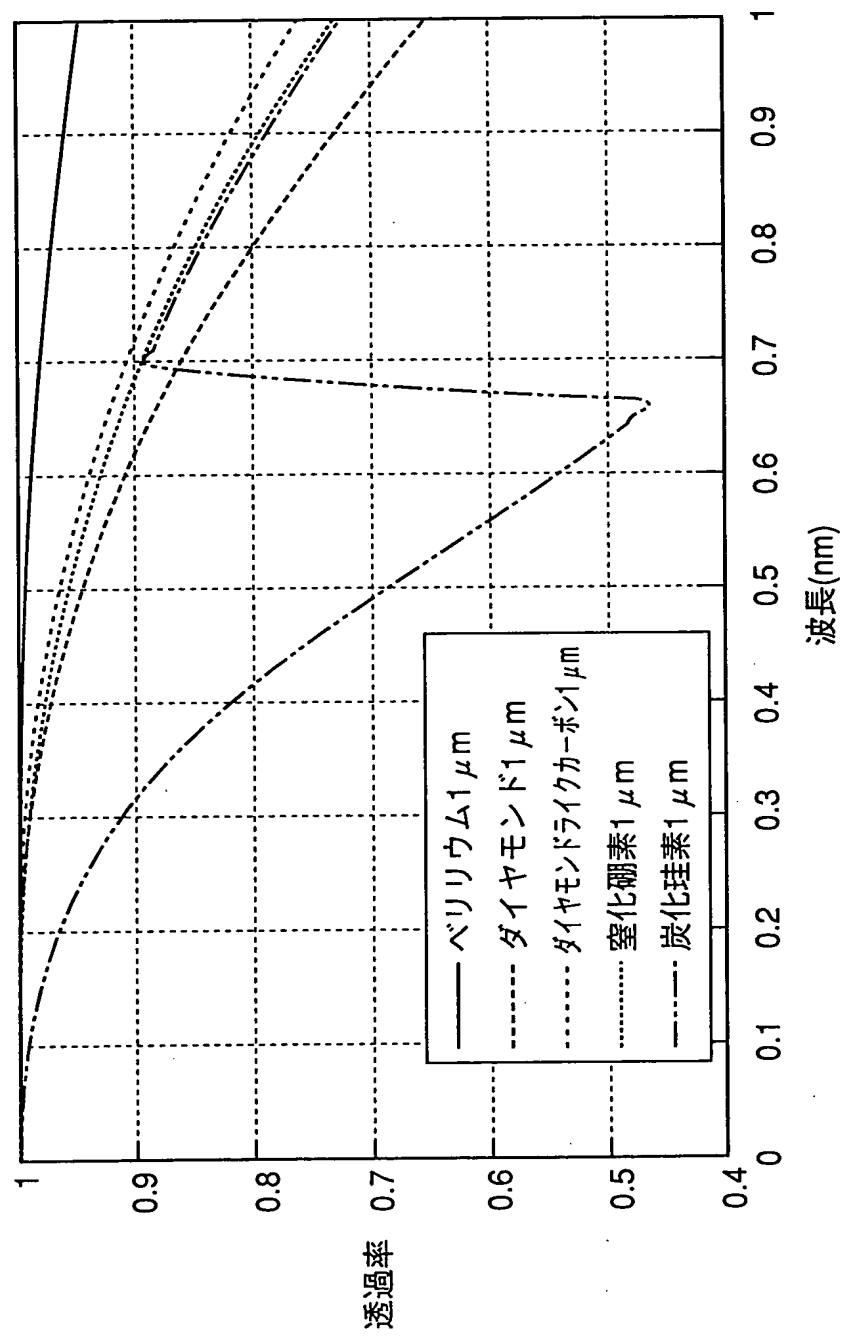


FIG. 6

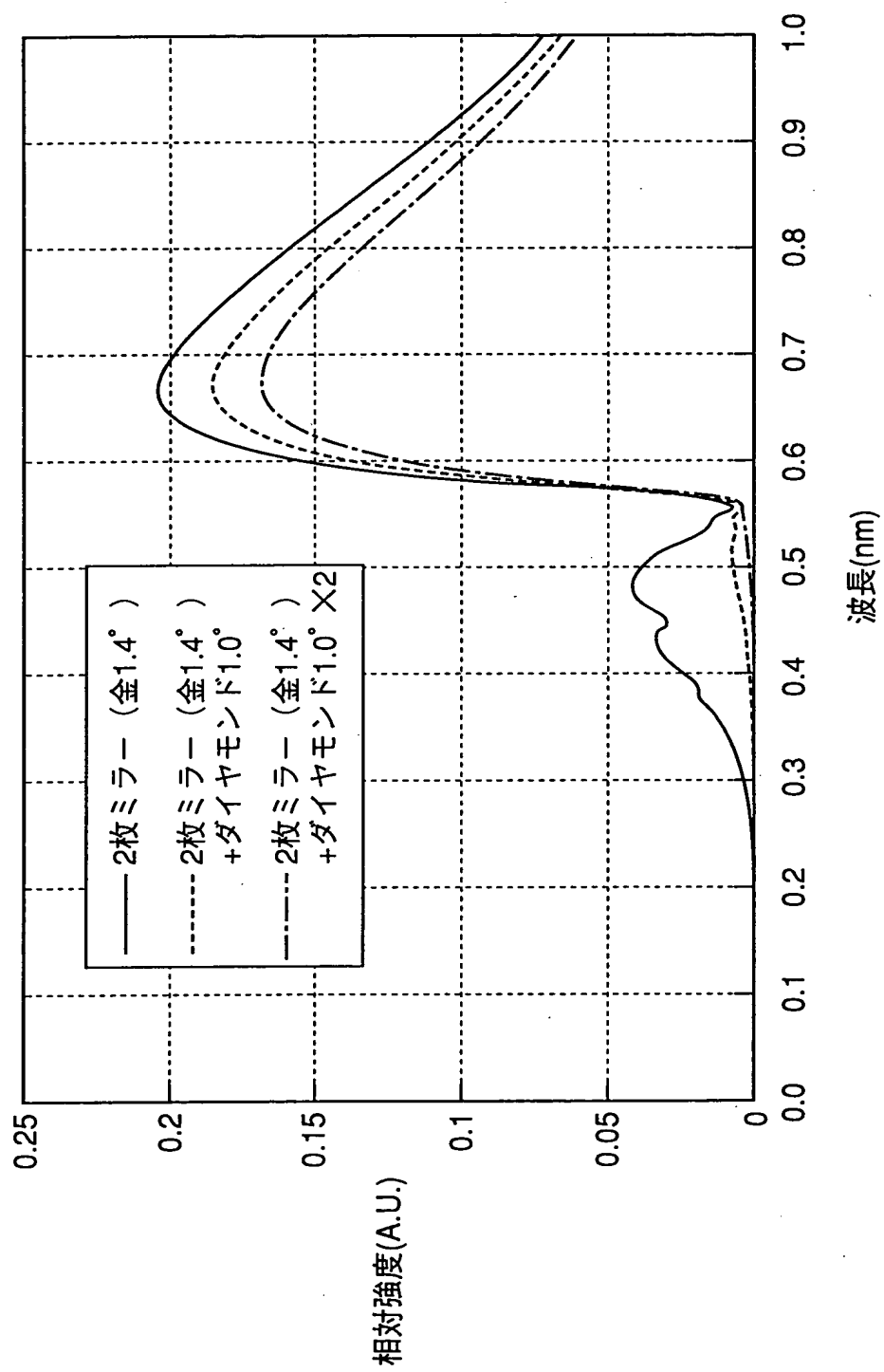




FIG. 7

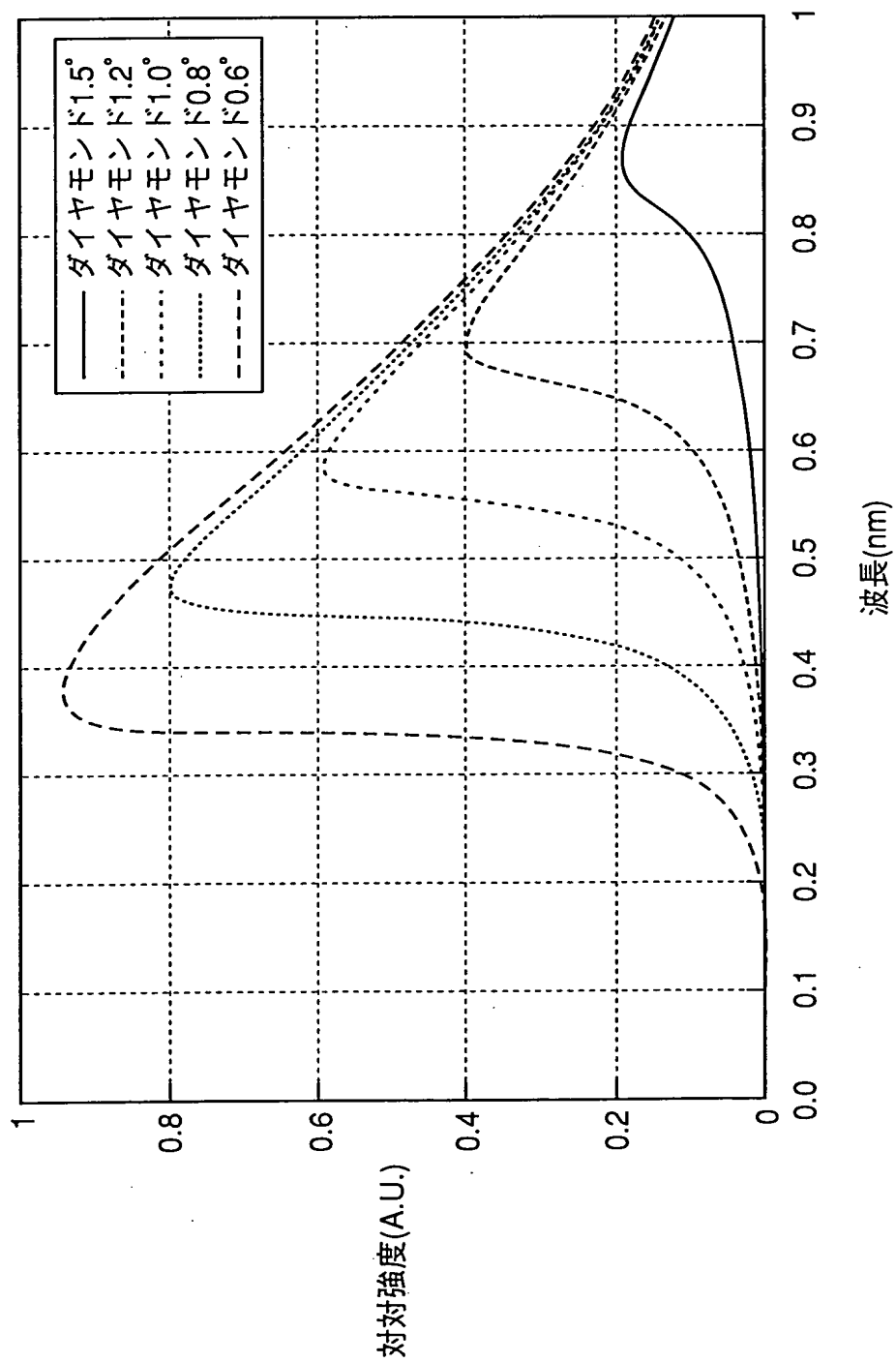


FIG. 8

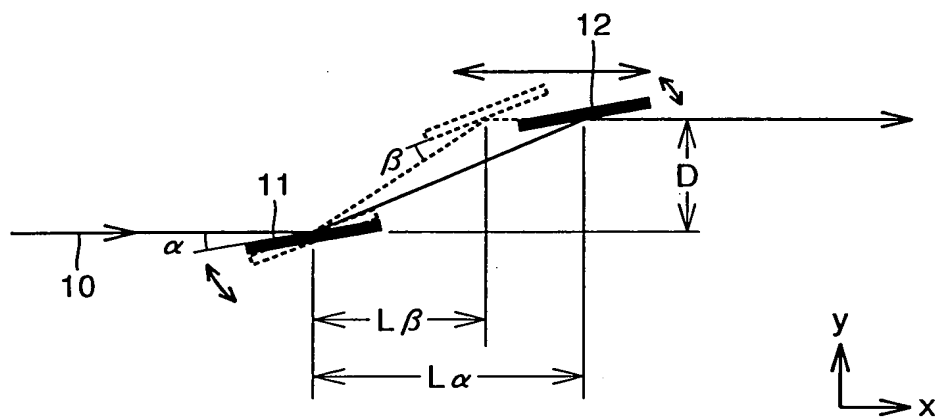


FIG. 9

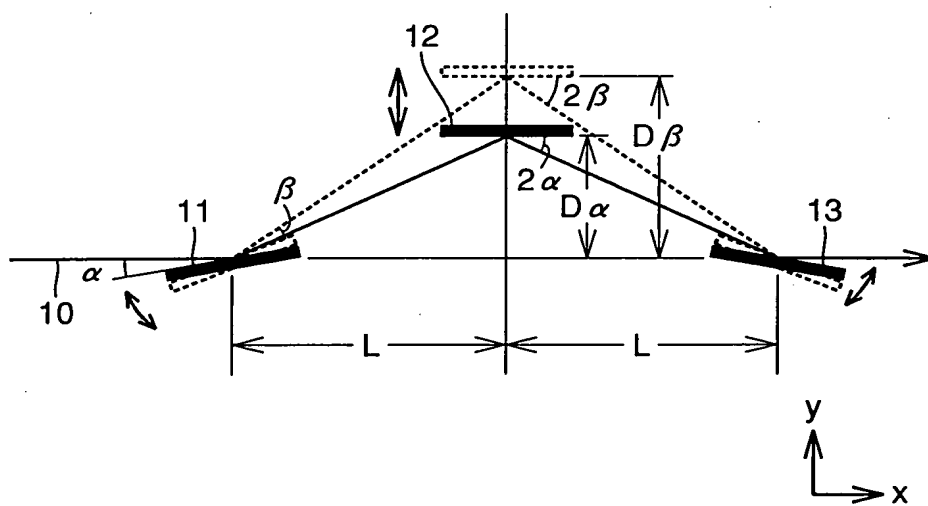


FIG. 10

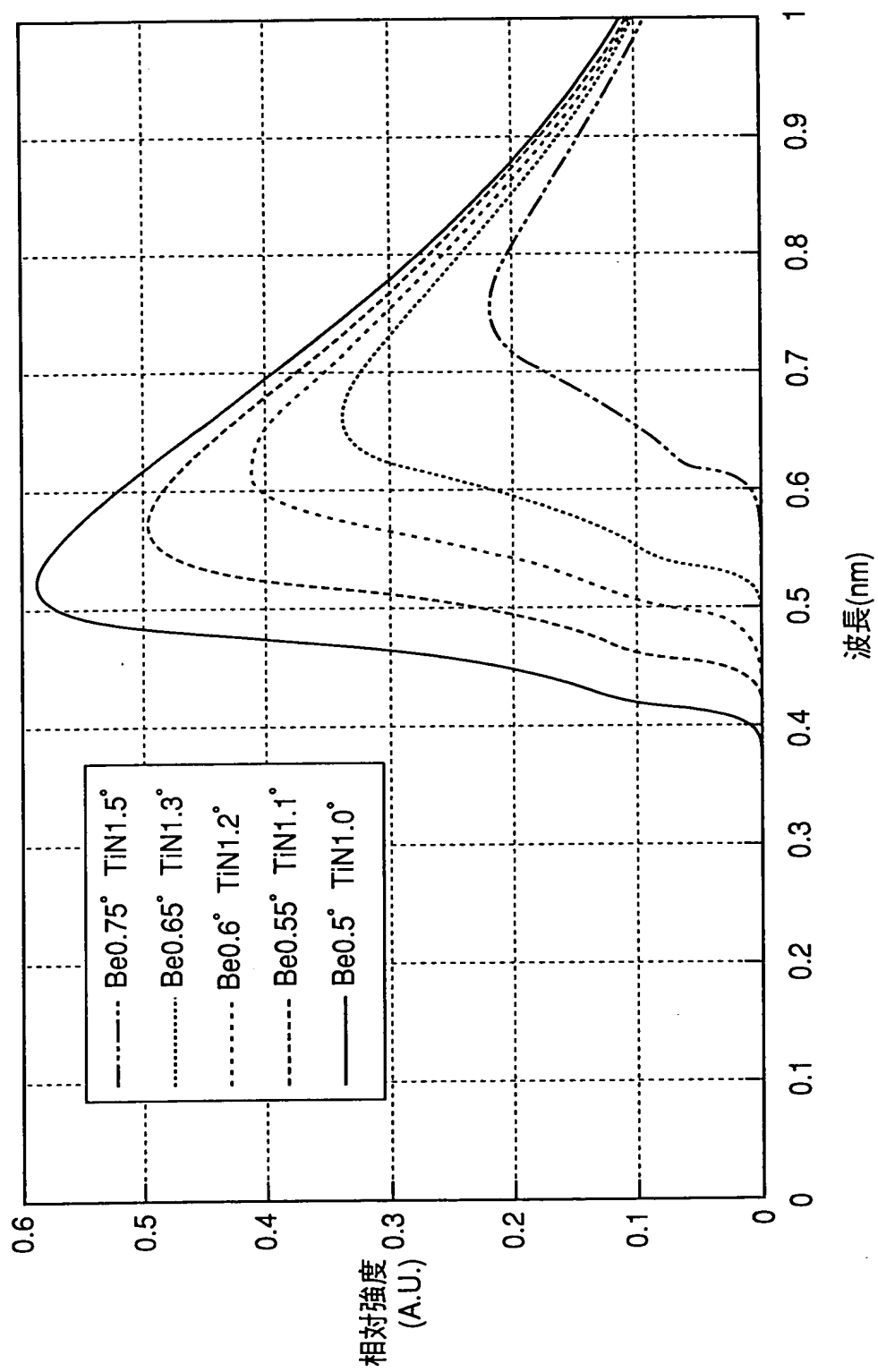


FIG. 11

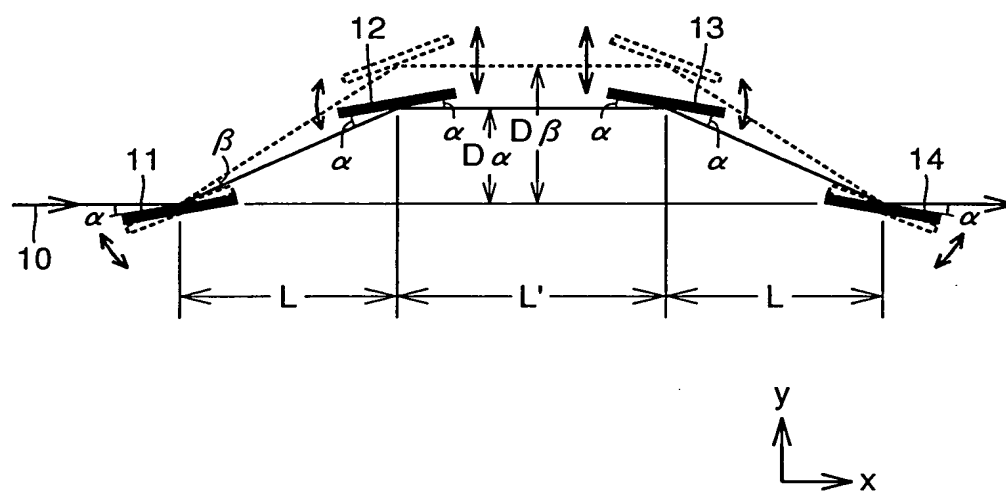


FIG. 12

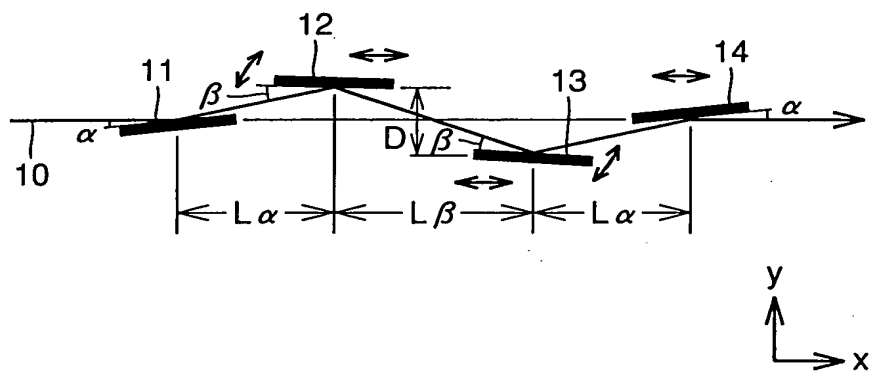


FIG. 13

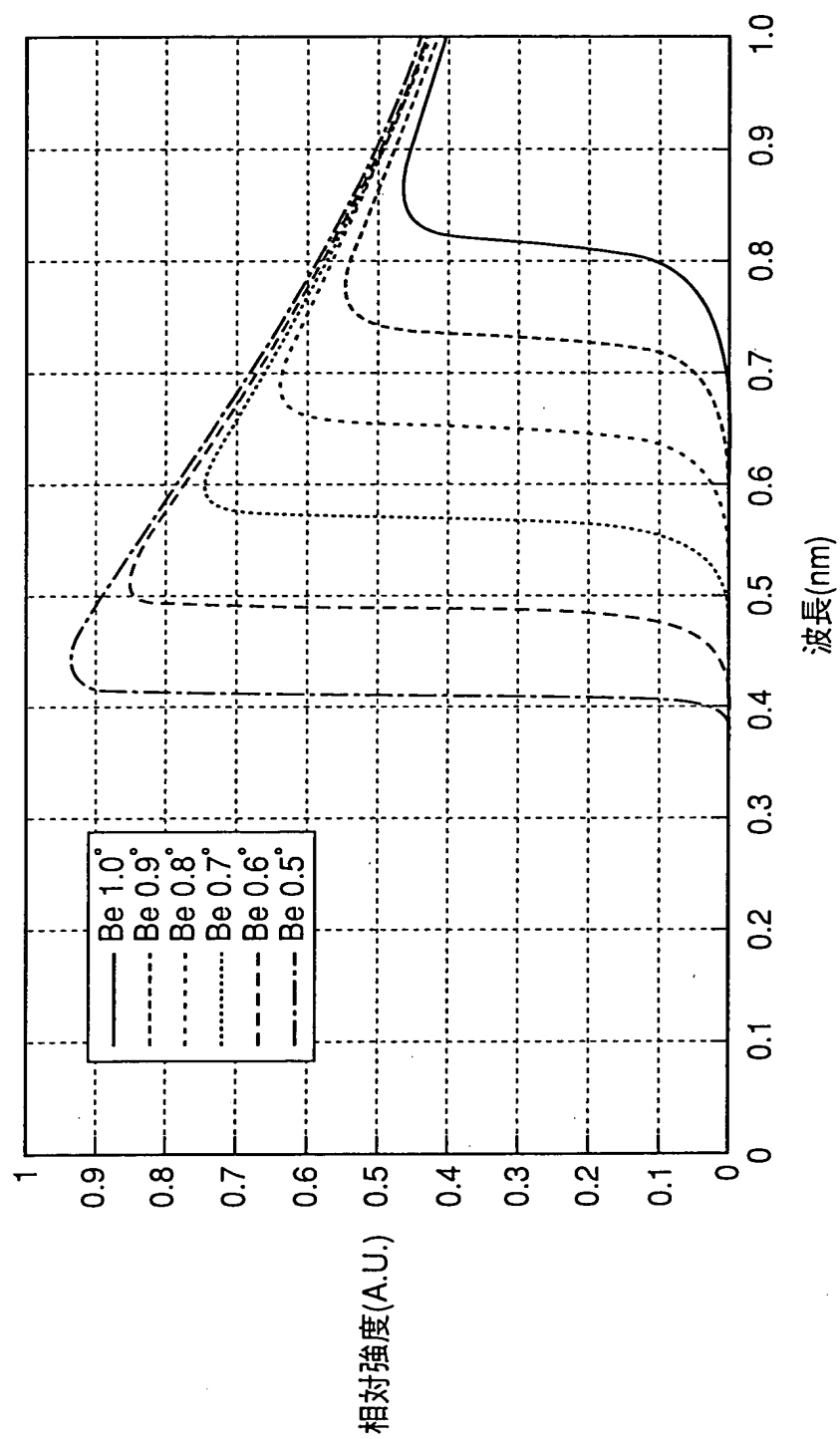


FIG. 14

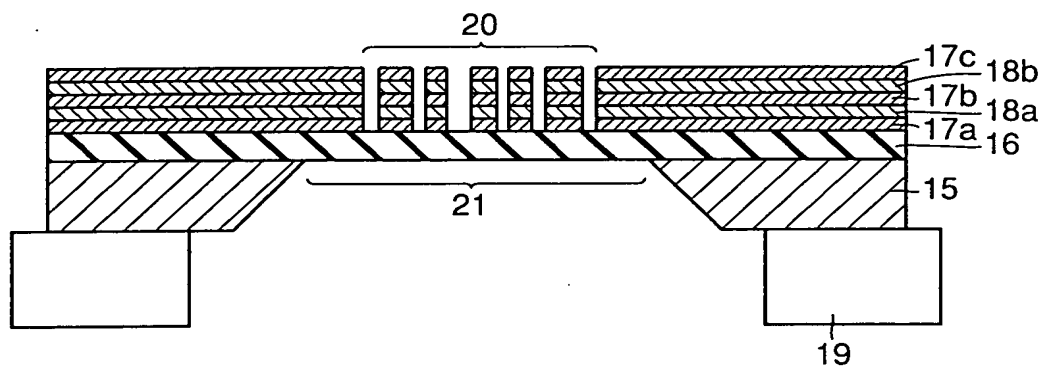


FIG. 15

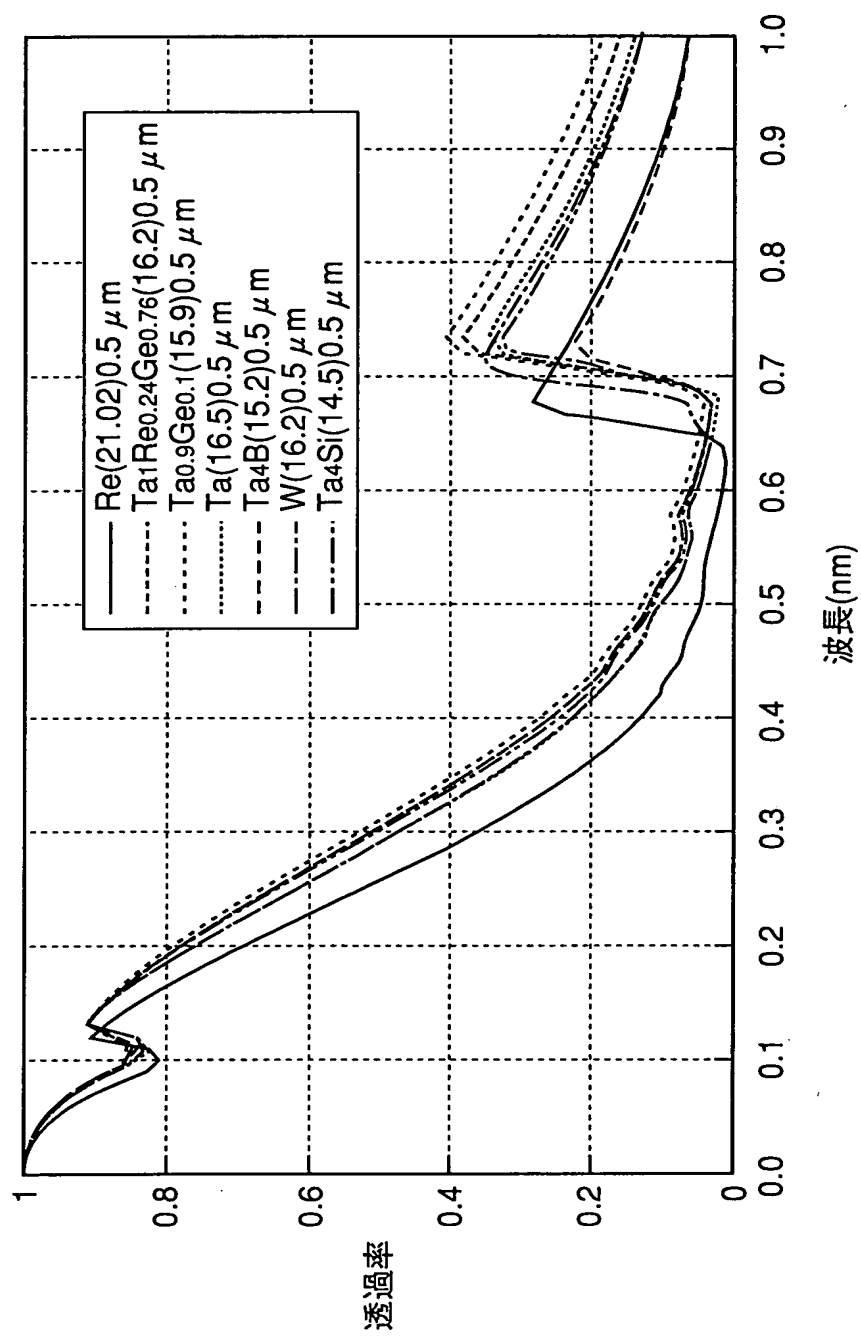


FIG. 16

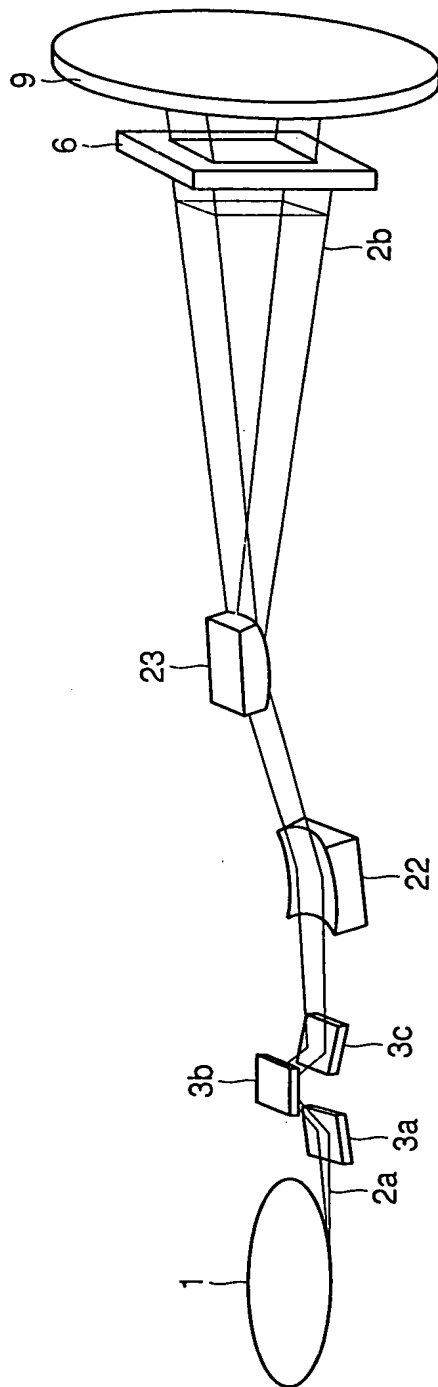




FIG. 17

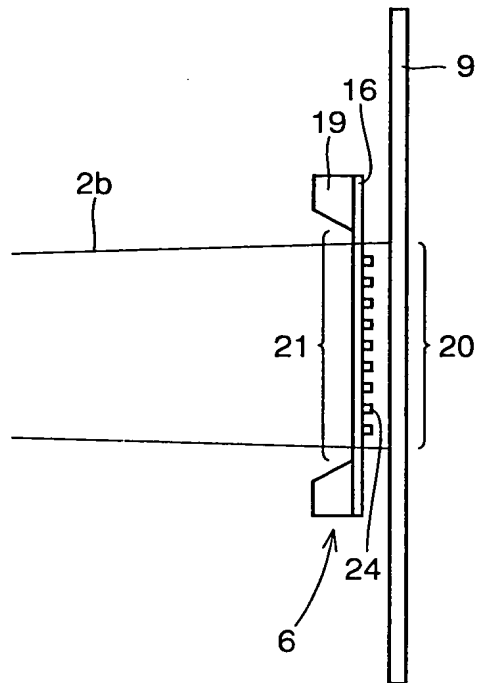


FIG. 18

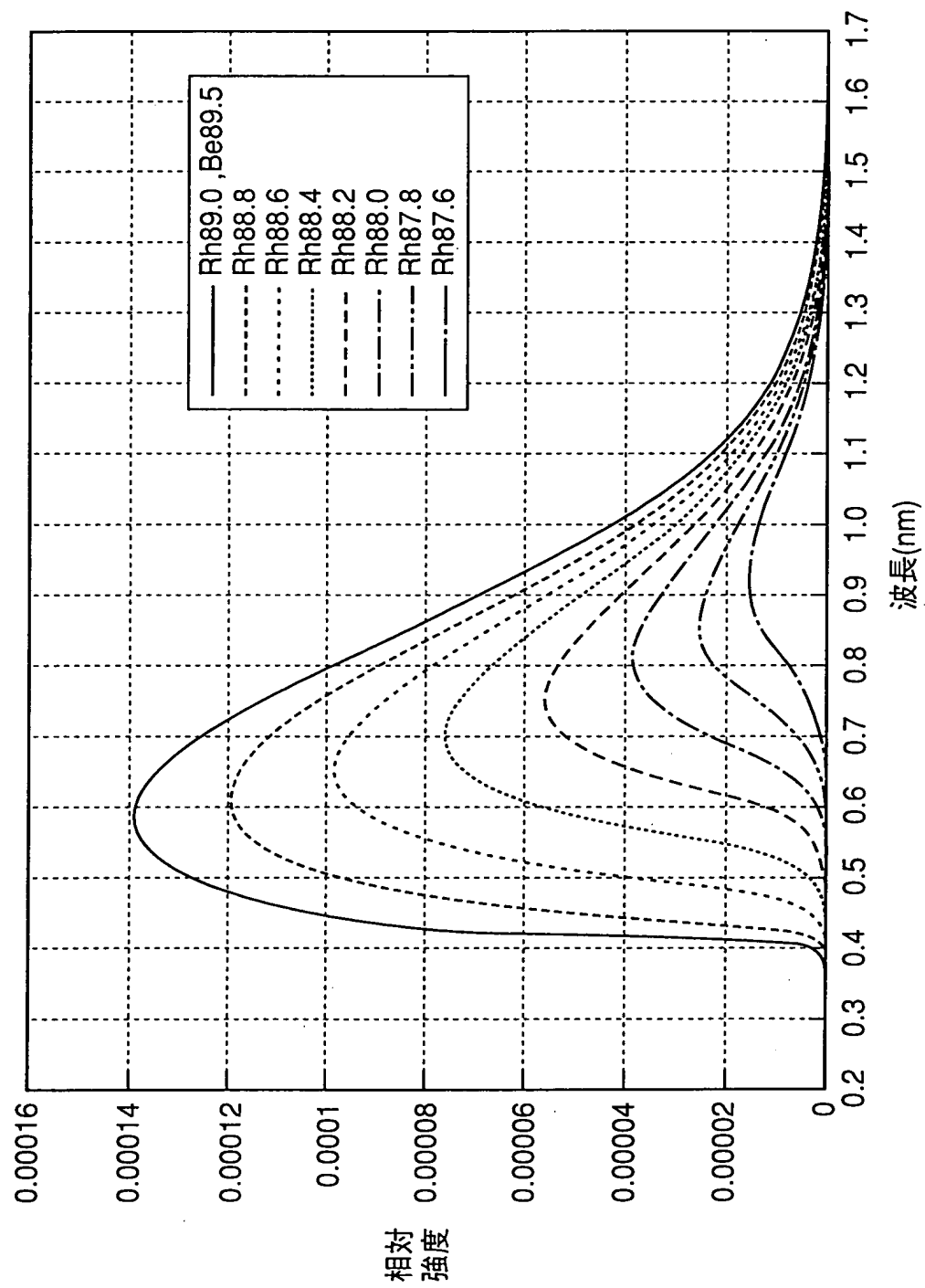


FIG. 19

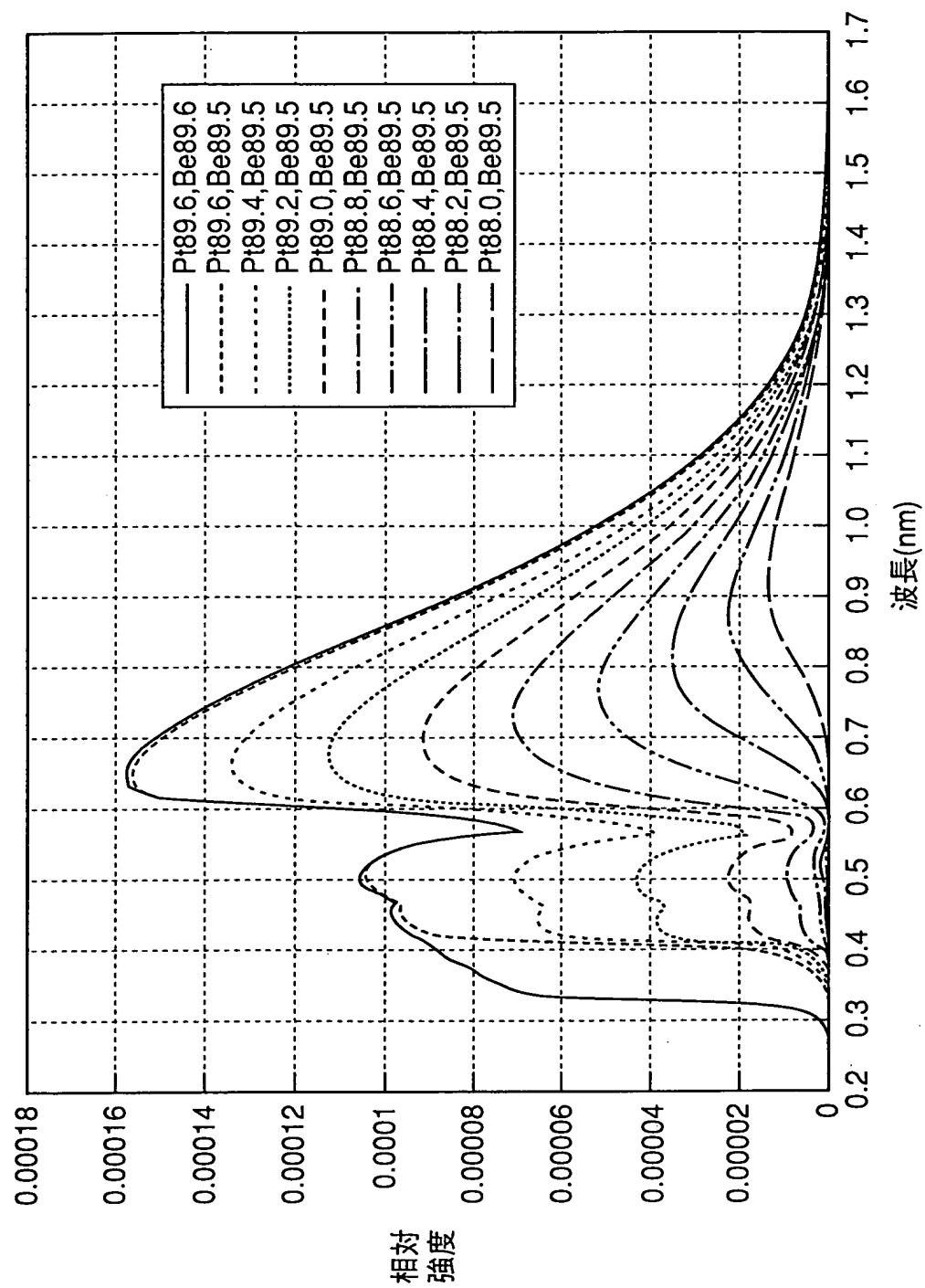


FIG. 20

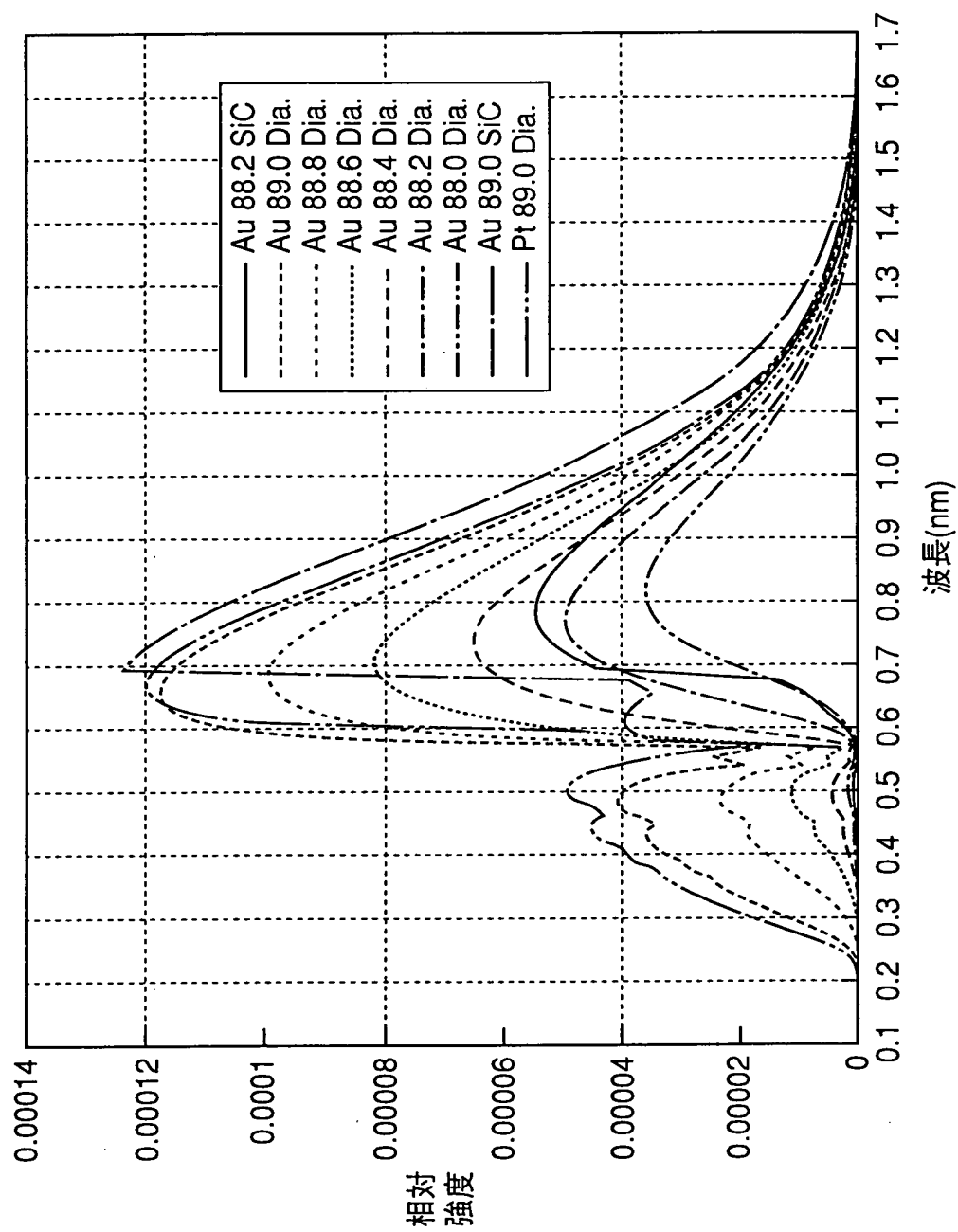


FIG. 21

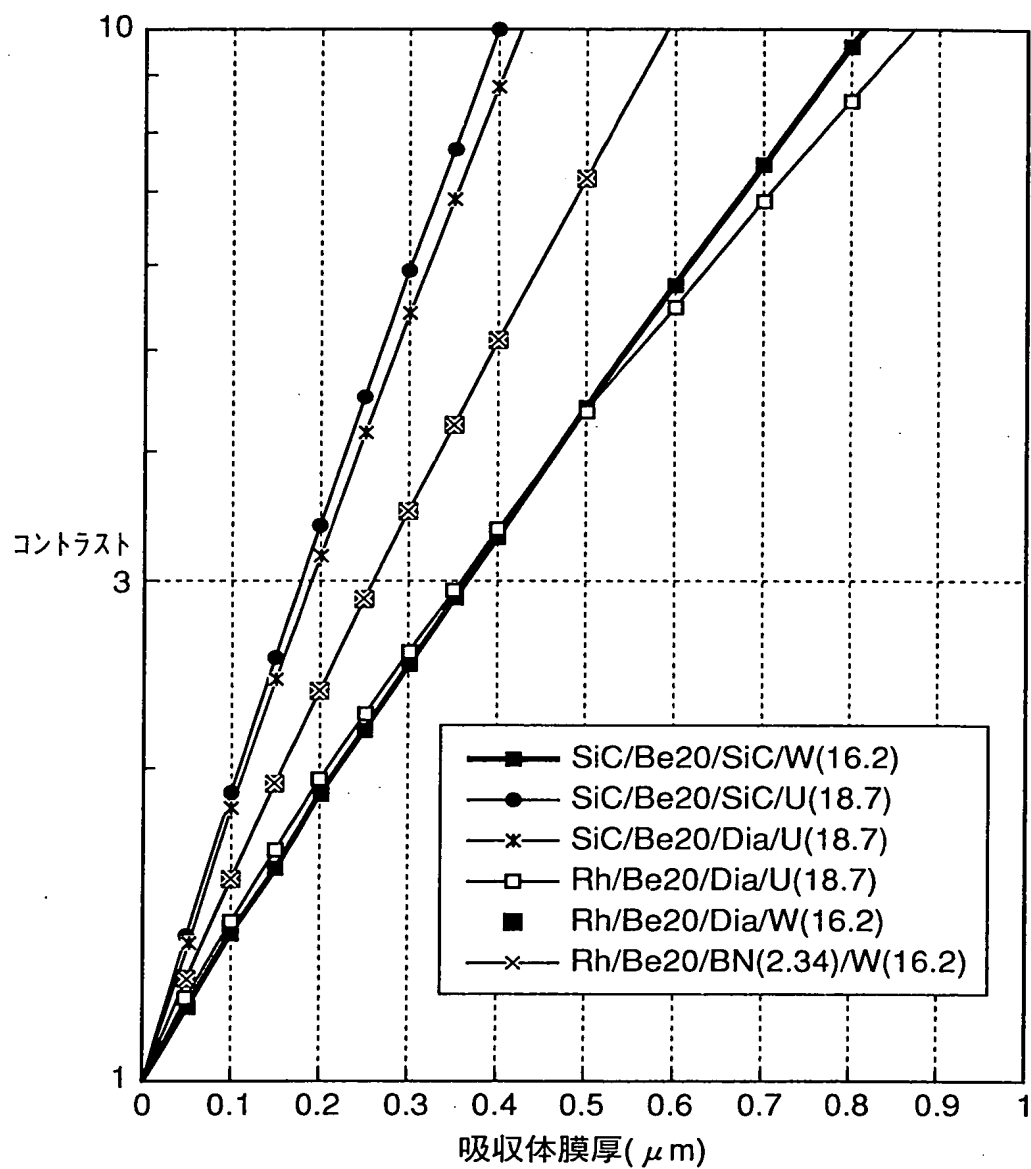


FIG. 22

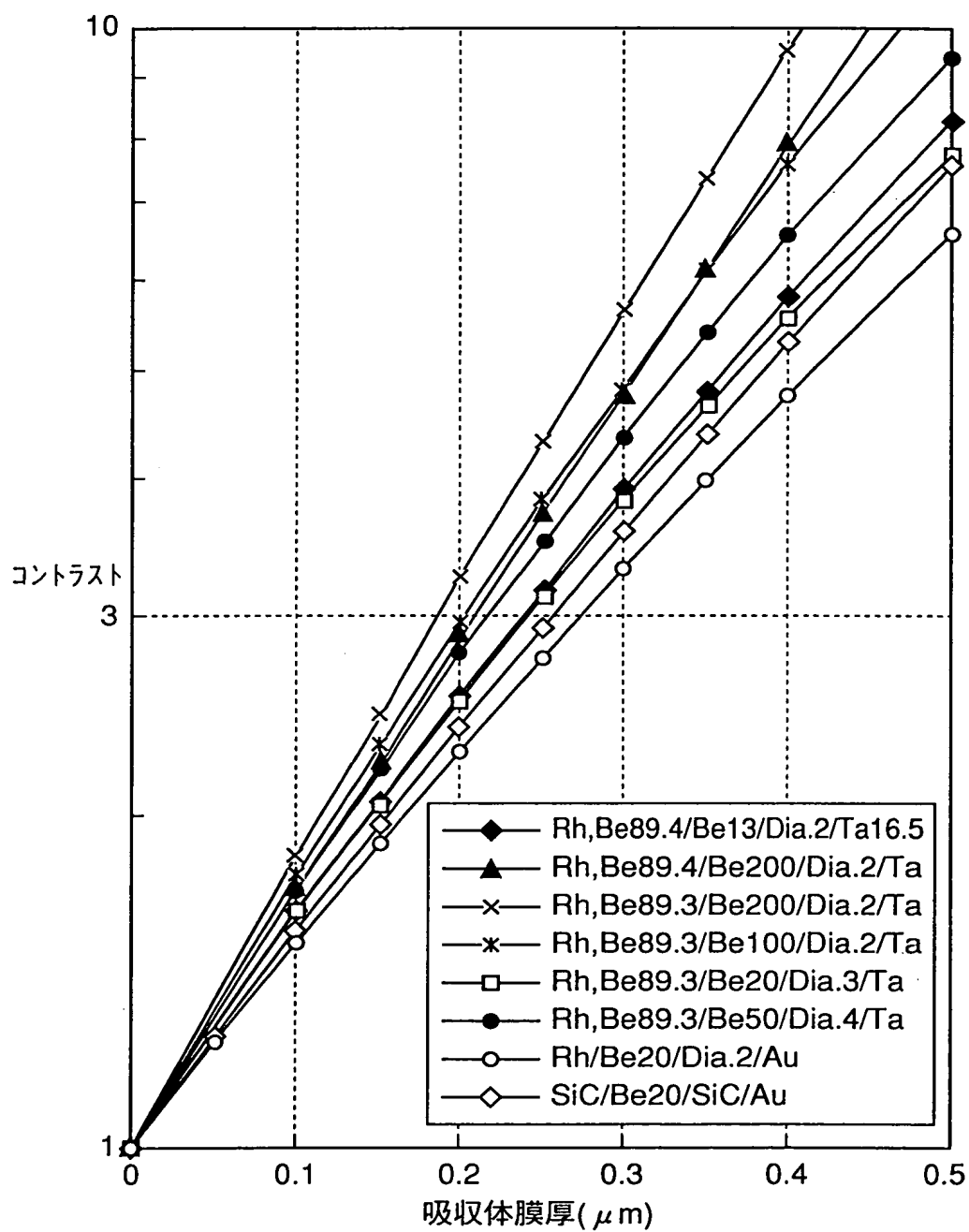


FIG. 23

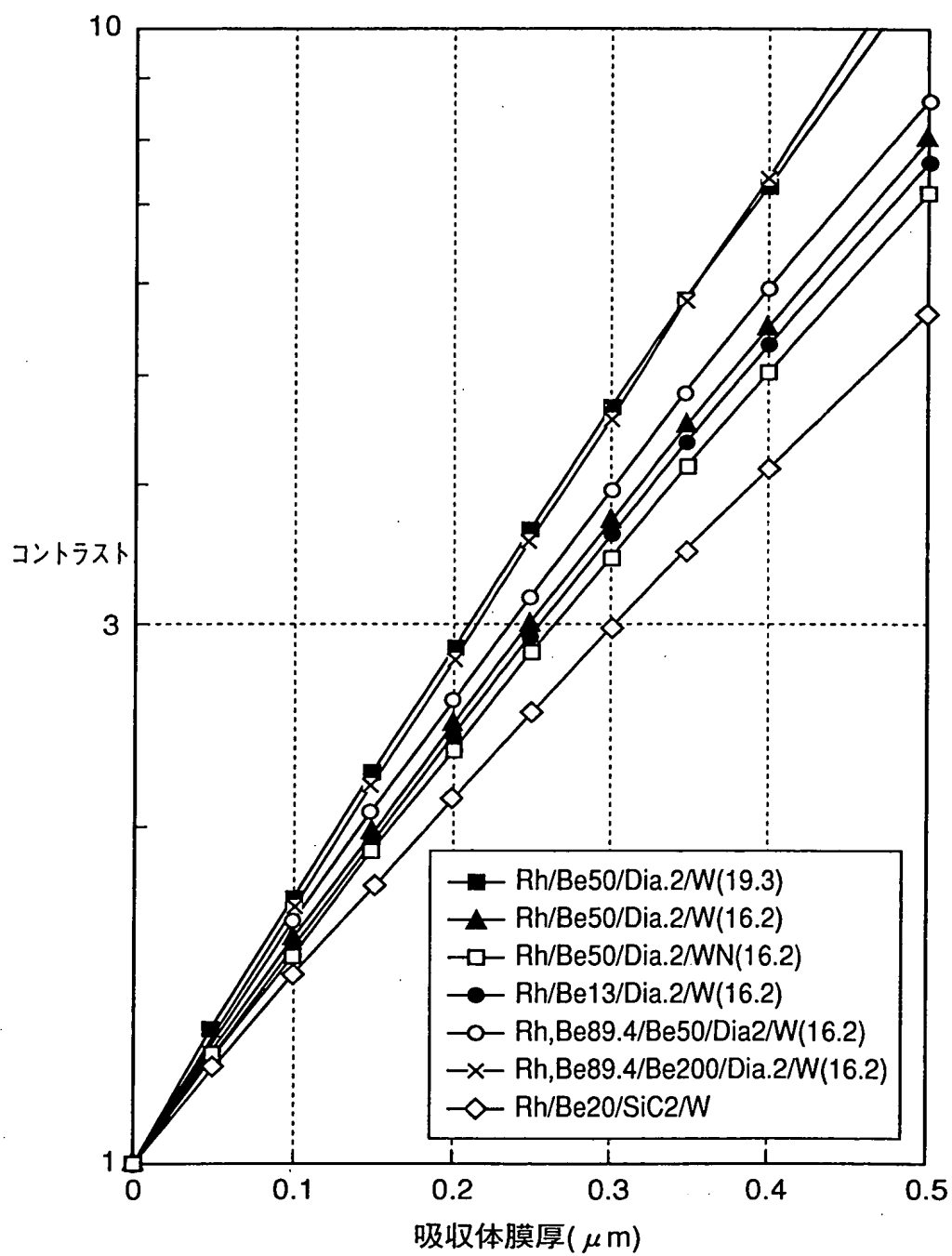


FIG. 24

